

**Ministère de l'enseignement supérieur  
et de la recherche scientifique**

**Université Mohamed Boudiaf - M'sila**



**Faculté de Technologie**

**Département d'Hydraulique**

**MEMOIRE**

**Présenté Pour l'Obtention du Diplôme de Master**

**FILIERE : Hydraulique**

**Option : Ouvrages Hydrauliques**

**THEME**

**Modélisation de la Pollution des Eaux Souterraines, Cas de la  
Plaine Alluviale de Bir Kasd Ali. Wilaya de Bordj  
Bouariridj.**

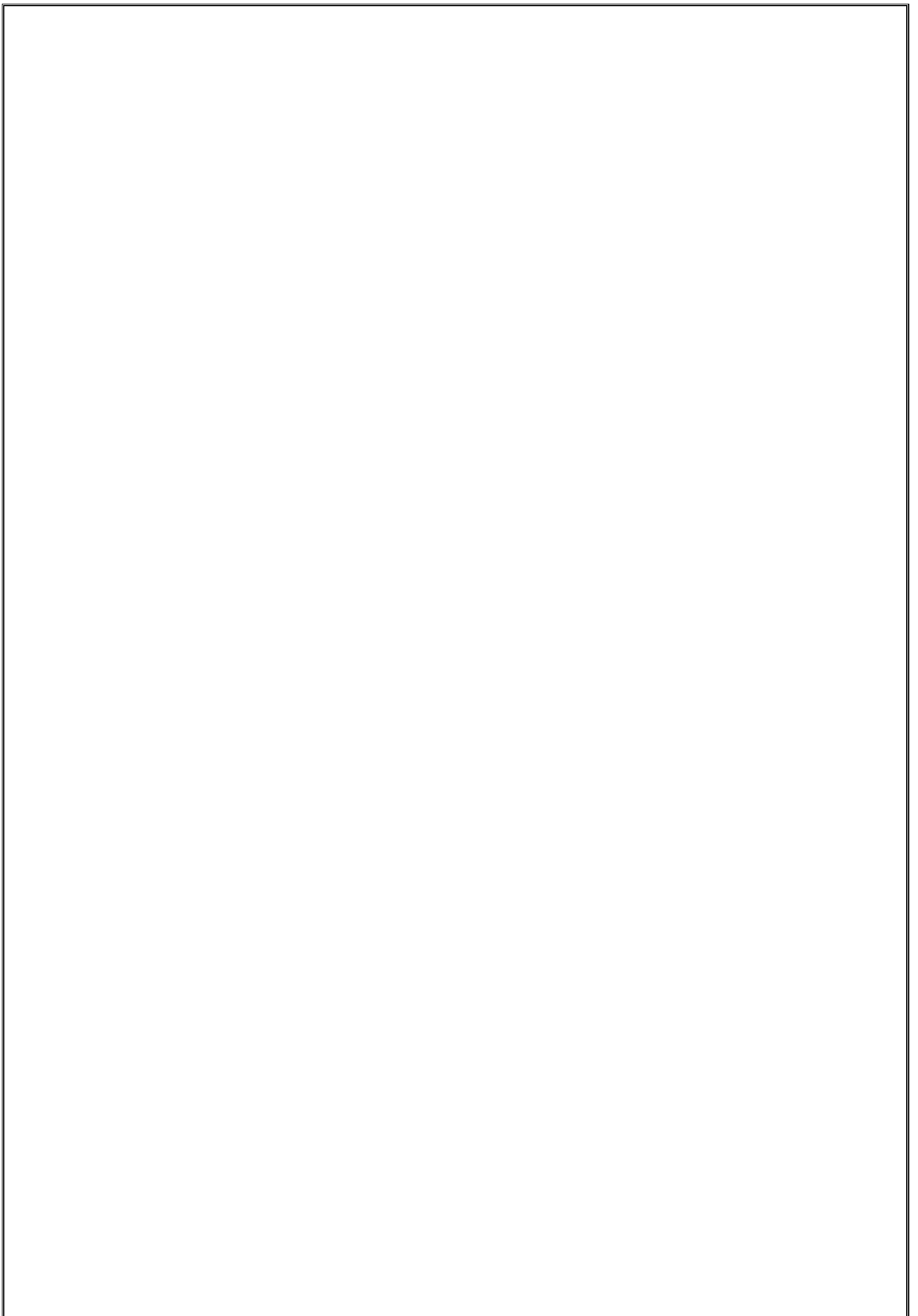
**Dirigé par :**

**M<sup>r</sup> Dr. M.GHODBANE**

**Présenté par :**

**DEGDEG Bilal**

**Promotion : 2019/2020**



# *Remerciements*

*Tout d'abord je remercie Dieu tout puissant qui m'a donné le courage, la volonté et la patience pour achever ce travail.*


*A l'issu de cette étude, Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à Mon encadreur **Mr. M.GHODBANE** pour sa contribution à l'élaboration de ce mémoire.*

*Mes remerciements vont également à l'ensemble des enseignants qui m'ont suivi durant mon cycle d'étude.*


*Mon respect aux membres du jury qui me feront l'honneur d'apprécier mon travail.*


# *Dédicaces*


*Je dédie ce modeste travail en signe de respect et de reconnaissance à :*

 *Mes très chers parents.*

 *Mes frères et sœurs.*

 *Toute ma famille.*

 *Tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans ma formation.*

 *Tous mes très chers amis: Sami, Saleh, Aissa, Messaoud, Mohamed, Idris, Nacer, Saïd, Yahia, Djamal, Fatehi.*

*DGEDGE BILALL*

## ملخص:

يظل الوجود المشترك للنشاط الزراعي وطبقة المياه الجوفية الضحلة حساسة للتلوث من المصادر الزراعية مثل أيونات النترات. حالة السهل الغربي لبير قسد علي الواقع بولاية برج بوعريريج ، صالح للزراعة وطبقة طينية ضحلة. يتم إعادة شحن هذه الصفيحة بشكل أساسي عن طريق التسلل والكتل الصخرية المتاخمة للسهل. في مثل هذه الحالة ، يؤثر تسرب النترات تحت الأراضي الزراعية بشكل كبير على تراكيز النترات في الخزان الجوفي. لهذا الغرض ، تم تنفيذ نمذجة برنامج Comsol من أجل معرفة تطور تراكيز النترات المكانية والزمانية وتأثيرها على المياه الجوفية لطبقة المياه الجوفية.

## Résumé:

La présence combinée d'activité agricole et d'une nappe alluviale peu profonde reste sensible à la pollution d'origine agricole comme les ions des nitrates. Le cas de la plaine alluviale de Bir Kasd Ali situé dans la Wilaya de Bordj Bouariridj, favorable à l'agriculture et d'une nappe alluviale peu profonde. La recharge de cette nappe se fait principalement par infiltration et les massifs bordant la plaine. Dans telle situation les fuites des nitrates sous les terrains agricoles influencent significativement les concentrations en nitrates de la nappe. Pour cela une modélisation par logiciel Comsol à été réalisée afin de connaitre l'évolution des concentrations des nitrates spatio-temporelle et leur impact sur les eaux souterraines de la nappe.

## Abstract:

The combined presence of agricultural activity and a shallow alluvial aquifer remains sensitive to pollution from agricultural sources such as nitrate ions. The case of the alluvial plain of Bir Kasd Ali located in the Wilaya of Bordj Bouariridj, favorable to agriculture and a shallow alluvial layer. The recharge of this sheet is mainly by infiltration and the massifs bordering the plain. In such a situation, nitrate leakage under agricultural terrain significantly influences nitrate concentrations in the aquifer. For this purpose, a Comsol software modeling was carried out in order to know the evolution of spatio-temporal nitrate concentrations and their impact on the groundwater of the aquifer.

# SOMMAIRE:

INTRODUCTION GENERALE:.....	01
<b>Chapitre I:PRESENTATION DU SITE D'ETUDE ET CONDUCTIONS NATURELLES.</b>	
<hr/> <hr/>	
I.1.Introduction :.....	02
I.2-Présentation de La zone d'étude:.....	02
I.2.1-Situation de Bassin Versant de laSoummam:.....	02
I.3- Situation de sous Bassin de Bousselem:.....	03
I.4. Développement et économie:.....	04
I.5 Habitats et activités:.....	05
I.6. Le relief:.....	05
I.6. a. Zone montagneuse:.....	05
I.6. b. Zone des hautes plaines:.....	05
I.6. c.Zone de dépression Sud:.....	05
I.7.Démographie:.....	05
I.8.Frontière:.....	06
I.9. Climatologie:.....	07
I.9.1Température:.....	07
I.9.2. Les précipitations:.....	08
I.9. 3.Synthèse des données climatiques:.....	08
I.9. 3.1.Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gaussen:.....	08
I.9. 3.2. Climagramme d'Emberger:.....	10
I.9.4.1.Autres facteurs climatiques:.....	10
I.9.4.2. Humidité relative:.....	11
I.10 Caractéristiques morpho métriques et physiques du B.V:.....	12
I.10.1 Caractéristiques morphologiques:.....	18
I.11 Réseau hydrographique:.....	23
I.12 Conclusion :.....	27
<b>Chapitre II: ANALYSE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE</b>	
<hr/> <hr/>	
II.1 analyse géologique :.....	26
II.1.1 Introduction :.....	26
II.2 Cadre géologique régional :.....	26
II.3 Les aquifèrespotentiels :.....	29
II.4 Géologie de la zone d'étude :.....	30
II.4.1 Litho stratigraphie :.....	30
II.4.1.1 Quaternaire :.....	30
II.5 Les nappes de charriages :.....	31
II.6 Tectonique cassante :.....	32

II.7 Sismicité:.....	32
II.8analyse Hydrogéologie:.....	33
II.8.1 Introduction :.....	33
II.9 Les unités hydrogéologiques du sous bassin versant d'Oued Boussemam :.....	33
II.10 Etude de la piézométrie :.....	34
II.11 Les caractéristiques hydrodynamiques des formations aquifères :.....	37
II.11.1 Méthodes des essais de pompages et interprétation des résultats :.....	38
II.11.2 Méthodes des essais de pompages et interprétation des résultats:.....	38
II.12 Détermination de la porosité efficace par la méthode d'Archie:.....	43
II.13 Conclusion:.....	44

## **Chapitre III: MODELISATION.**

III. Introduction.....	46
III. Présentation du modèle COMSOL Multiphysique:.....	46
III.1.1 Définition:.....	46
III.1.2 La méthode des Eléments Finis:.....	47
III.1.3 Présentation générale du logiciel:.....	47
III.1.3.1 Le module de sciences de la Terre:.....	47
III.1.4Mode opératoire de COMSOL Multiphysics:.....	47
III.1.4.1 Réglages des axes et des grilles:.....	51
III.1.4.1 Outillage de dessin:.....	52
III.1.4.2 Maillage:.....	53
III.1.4.3Les constantes et les variables:.....	54
III.1.4.4 Conditions de frontières:.....	57
III.2Simulation et traitement des résultats:.....	57
III.3Modélisation de transport du polluant:.....	58
III.3.1 L'Écoulement d'un fluide:.....	59
III.3.1.1 Conditions aux limites et conditions initiales:.....	61
III.3.2 Transport de soluté (Nitrates):.....	61
III.3.2.1 Conditions aux limites et conditions initiales:.....	63
III.3.3 Méthodologie:.....	66
III.3.4 Etapes du Modèle Chemin: Subsurface_Flow_ModuleSolute_Transport sorbing_solute:.....	67
III.5 Application du modèle par les données du site d'étude:.....	67
III.5.1 Présentation du site d'étude:.....	67

<b>III.5.2 Traitement des données du site d'étude:</b> .....	<b>68</b>
<b>III.5.2.1 Géométrie du modèle du site d'étude:</b> .....	<b>69</b>
<b>III.5.2 Résultats et discussion:</b> .....	<b>69</b>
<b>III.6 Conclusion:</b> .....	<b>74</b>
<b>CONCLUSION GENERALE:</b> .....	<b>75</b>

## *Liste des tableaux:*

### **Chapitre I:PRESENTATION DU SITE D'ETUDE.**

---

---

<b>Tableau I.1 :</b> Estimations la population dans le bassin versant moyen d'oude bousselem Selon le recensement 2017.....	06
<b>Tableau I.2:</b> Températures moyennes mensuelles en degrés Celsius corrigées delarégiond'étude pour la période (1978-2017).....	07
<b>Tableau I.3:</b> La répartition des précipitations moyennes mensuelles en (mm) de la station de Bejaia et notre région d'étude (1970-2017).....	08
<b>Tableau I.4:</b> les données climatiques corrigée(températures moyennes et hauteurs totalesmensuelles des précipitations) :.....	09
<b>Tableau I.5:</b> Partition mensuelle de l'humidité relative.....	12
<b>Tableau I.6:</b> Répartition mensuelle de la vitesse moyenne du vent (m/s).....	12
<b>Tableau I.7:</b> Répartition mensuelle du nombre de jours de gelées.....	13
<b>Tableau I.8:</b> Répartition mensuelle du nombre de jours de neige.....	14
<b>Tableau I.9:</b> Répartition mensuelle du nombre d'heures d'insolation.....	23
<b>Tableau. I.10:</b> classification des Reliefs.....	23
<b>Tableau. I.11:</b> Principales caractéristiques morpho-métriques du sous bassin le Bousselem moyen.....	26

### **Chapitre II: ANALYSE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE.**

---

---

<b>Tableau II.1.</b> Inventaire des points d'eau.....	35
<b>TableauII.2:</b> Quelques Ordres de grandeurs des valeurs de la porosité totale et efficace (BRGM).....	37
<b>Tableau II.3</b> Valeurs de la transmissivité de l'aquifère.....	40
<b>Tableau II.4:</b> valeurs de la porosité efficace d'après la méthode d'Archie.....	40

### **Chapitre III: MODELISATION.**

---

---

<b>Tableau.III.1.</b> Le tableau suivant fournit des données pour le modèle d'écoulement de fluide.....	40
<b>Tableau.III.2.</b> Les entrées nécessaires pour le modèle de transport de soluté sont:.....	65

## *Liste des Figures:*

### **Chapitre I:PRESENTATION DU SITE D'ETUDE.**

---

Figure n° .1:Situation géographique du grand bassin de la Soummam.....	02
Figure n° .2 Situation géographique du sous-bassinmoyendeBousselem amont.....	03
Figure n° 3 .B.V moyen de OuedBousselam par satellite.....	04
Figure n° 4: diagramme OmbrothermiqueBagnouls et Gausсен de notre zone d'étude. (bassinversantBousselam) (1978-2017).....	10
Figure n° 5: classification climatique de la région d'étude d'après le diagramme d'Emberger.....	11
Figure N° I.6: Diagramme Des Vitesses Moyennes Du Vent (M/S).....	13
Figure N°I.7 : Diagramme Des Nombres De Jours De Gelées.....	14
Figure n°I.8 : diagramme du nombre moyen d'heuresd'insolation.....	15
Figure n° I.9. Carte du réseau hydrographique du sous bassin versant de Boussellam amont.....	24

### **Chapitre II: ANALYSE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE.**

---

Figure n° II.1 Schéma structural simplifié.....	28
Figure n° II.2 coupes interprétatives. ....	28
Figure n° II.3 colonne lithostaratiagraaphique de la région d'étude.....	29
Figure n° II.4 carte géologie d'OUDE BOUSSLAM .....	30
Figure n° .II.5 Schéma structural simplifiée.....	32
Figure n° II.6 Carte de fracturation.....	32
Figure n° II.7 Carte de zonage sismique de la terrine nationale.....	33
Figure n° . II.8: Carte d'inventaire des points d'eau.....	35
Figure n° .II.9 Carte piézométrique.....	36
Figure n° .II.10.Evolution spation-temporelle de la piézométrie selon le sens découlement.....	41
Figure n° II.11 La courbe de la descente.....	41
Figure n° II.12 La courbe de la remontée.....	42
Figure n° II.13 La courbe de la descente.....	42
Figure n° II.14 La courbe de la remontée.....	43
Figure n° II.15 La courbe de la descente.....	43
Figure n° II.16 La courbe de la remontée.....	43

## Chapitre III: MODELISATION.

Figure n° III.1-Nouveau Modèle.....	48
Figure n° III.2 Bibliothèque de Modèles.....	49
Figure n° III.3 Nouveau modèle écoulement de fluide.....	51
Figure n° III.4-Réglages des axes.....	52
Figure n° III.5 -Réglages des grilles.....	52
Figure n° III.6-Outillage de dessin, Barre d'outils.....	53
Figure n° III.7- différents types de maillage.....	54
Figure n° III.8-les constantes.....	54
Figure n° III.9-expressions scalaires.....	55
Figure n° III.10-Sous-domaines Coefficient.....	56
Figure n° III.11-Sous-domaines Initial.....	57
Figure n° III.12- limites.....	57
Figure n° III.13-paramètres des solveurs.....	68
Figure n° III.14: La géométrie de la bague d'infiltration et de la colonne de sol.....	66
Figure n° III.15: La géométrie de la bague d'infiltration et de la colonne de sol du site d'étude.....	69
Figure n° III.16 Estimations de saturation effective (trace de surface) et la vitesse (les isochètes) dans le sol de manire variable saturé après 1 jour.....	70
Figure n° III.17 Estimations de saturation effective (trace de surface) et la vitesse (les isochètes) dans le sol de manire variable saturé après 10 jour.....	71
Figure n° III.18. sresolution pour des concentrations de produits (tracé de surface) et de facteur de retardement (contours) à 1 jour.....	72
Figure n° III.19. sresolution pour des concentrations de produits (tracé de surface) et de facteur de retardement (contours) à 10 jour.....	73
Figure n° III.20: analyse sélective du facteur de retardement (de surface et les contours) à 5 jours.....	74

# **INTRODUCTION GENERALE**

## - Introduction générale :

L'eau est un liquide précieux parce qu'il est à l'origine de la vie. Sans eau, il n'y aurait pas de vie sur terre. Elle est indispensable aux hommes, aux animaux, aux plantes.

L'eau souterraine est l'eau qui existe dans les pores, les fissures des roches et dans les sédiments sous la terre. Elle est issue des précipitations (Pluies, neige et grêles), infiltrent dans les sols et alimentent les systèmes des eaux souterraines. Mais ces dernières années même les eaux souterraines ne sont pas protégées de la Pollution, représente un danger créé par l'être humain qui menace notre environnement.

Les causes de la pollution sont variées. Mais les plus remarquables sont celles liées à l'activité humaine et notamment :

- L'exploitation non rationnelle des ressources ;
- Les rejets domestiques et industriels (solides et liquides) non contrôlés et non traités préalablement avant le rejet dans le milieu naturel ;
- L'utilisation excessive de fertilisants chimiques a un impact néfaste sur la qualité des eaux souterraines.

A présent, avec l'accélération du développement démographique et économique ainsi que l'évolution du mode de vie oblige de prendre en considération l'étude de la qualité et quantité des eaux souterraines destinée à la consommation. Pour donner du concret à ce problème nous prendrons comme exemple la pollution des eaux souterraines de la zone de Bir Kasd Ali située dans la Wilaya de Bourdj Bouariridj par les nitrates. Dans ce cadre, notre étude proposée est pour l'objet de connaître les caractéristiques géologiques, hydrogéologiques, et hydrochimiques avec une mise en relief des différentes sources de pollution et leur impact sur les eaux souterraines. Cette étude est basée sur trois axes principaux :

- ✓ En premier axe notre étude présente les caractéristiques morphologiques du site d'étude de la zone de Bir Kasd Ali et suivi d'une présentation démographique ainsi description hydrologique.
- ✓ En deuxième axe une présentation géologique et hydrogéologique qui définit les formations aquifères, afin de connaître les types de nappes et le sens des écoulements principaux.
- ✓ En troisième axe une modélisation de la pollution des eaux souterraines par les « Nitrates » par le logiciel Comsol et exposition des résultats.

En fin une conclusion générale de cette étude récapitulant les principaux résultats et les solutions appropriées pour protéger cette ressource.

**Chapitre I :PRESENTATION DU SITE D'ETUDE  
ET CONDUCTIONS NATURELLES.**

### -Introduction :

Avant de traiter notre sujet il faut avoir une idée générale sur l'emplacement de notre site d'étude concernant une vision géographique, démographique, climatique, administrative et morpho métriques.

### I.1 -Présentation du Site et Conditions Naturelles :

#### I.1.1-Situation de Bassin Versant de la Soummam :

Avec une superficie de 9125 Km<sup>2</sup> le bassin versant de la Soummam ( **Figure n° I.1**) est l'un des grands bassins Algériens, soit 19 % de la superficie totale du grand bassin (Algérois – Hodna-Soummam(AHS)) ; il s'étend sur l'Est l'Algérois à 100 Km au Sud de la capitale Alger, sa position exacte est définie par l'espace se trouvant entre les méridiens 3°.38 et 5°.38 EST et les parallèles 35°.45 et 36°.45 Nord, il est limité par les chaînes montagneuses du Djurdjura et ses contreforts qui s'étendent jusqu'à la mer au Nord, les contreforts du mont du Hodna au Sud, les chaînes des Babors et le plateau de Sétif à l'Est, le plateau de Bouira à l'Ouest.

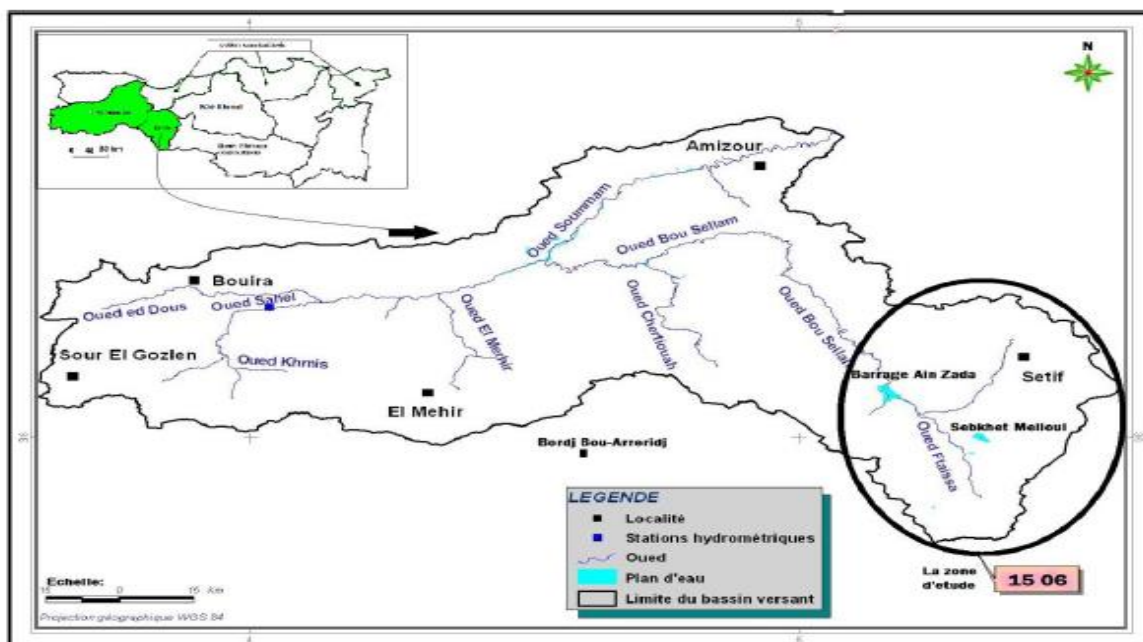


Figure n° I.1: Situation géographique du grand bassin de la Soummam.

### I.2- Situation de sous Bassin de Bousselem:

L'oued Bousselem est le principal affluent de la Soummam avec une longueur de 150 Km et drainant une surface de 5010 Km<sup>2</sup>. Ce sous bassin est subdivisé en quatre sous bassins (le Bousselem amont (C/ 15 06, S/1785 Km<sup>2</sup>), le Bousselem moyen (C/ 15 07, S/1234 Km<sup>2</sup>), El Moyen (C/ 15 08, S/930 Km<sup>2</sup>) et le Bousselem aval (C/ 15 09, S/1061 Km<sup>2</sup>) Nous nous intéresserons que le sous bassin moyen ayant pour code C15 06 (Figure n° I.2).

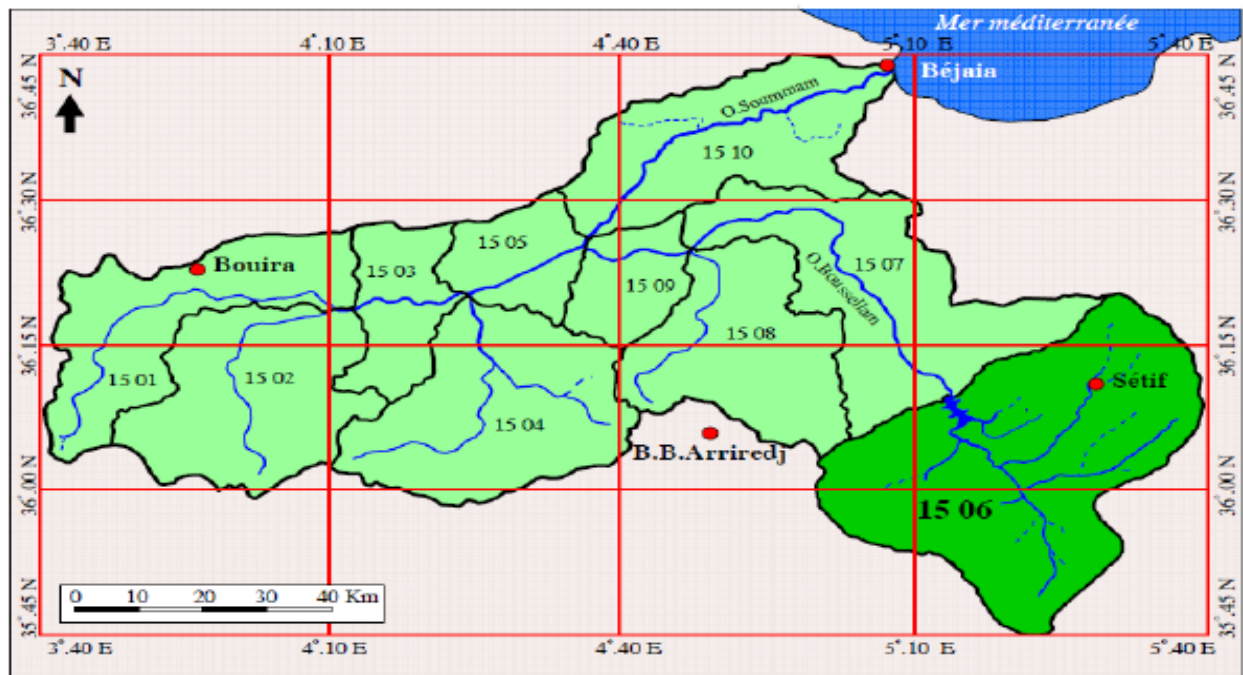


Figure n° I.2 Situation géographique du sous-bassin moyen de Bousselem amont.

Ce sous bassin occupe 21 % de la surface du grand Bousselem (1785 Km<sup>2</sup>) et une longueur de 21 Km. Il se situe entre le grand bassin Constantinois à l'Est, et celui de Hodna au Sud, et le sous bassin de Bousselem moyen à l'Ouest Il est limité (Figure n° I.3 ).

- Au Nord par Bouгаа
- A l'Est ain arnat
- Au Sud Tixter
- A l'ouest par la commune de ouled sisi amer

Administrativement, ce sous bassin moyen se trouve à cheval sur deux wilayas, Sétif et une Bordj Bou-Arredj. Ce sous bassin est contrôlé par le barrage de Ain zada avec une

capacité utile de 110 Mm<sup>3</sup> et permet d'assurer les besoins en eau potable et industrielle des villes de la wilaya de Sétif, et celle de Bordj Bou Arréridj



**Figure n° I.3 . Vue satellitaire du sous bassin versant moyen d'Oued Bousselem.**

La superficie du bassin de l'Oued Bousselem de l'amont à l'aval est de 1785 km<sup>2</sup>

La zone du bassin de l'Oued Bousselem de Bougaa à l'ébullition du barrage d'Ain Zad 387 Km<sup>2</sup>

### ***I.3. Développement et économie :***

L'emplacement de l'Oued Bousselem occupe un emplacement géographique stratégique. Ce site est situé à **6km** Kilomètres de la route nationale n ° 05 Liée entre le golfe d'Alger et Constantine, en passant par les villes Alger, Boumerdès, Bouira, Bordj Bou Arréridj, Sétif, Mila et Constantine.

-Situé sur une superficie totale de 387 km<sup>2</sup> dont 70% de -superficie totale, de terres et de terres agricoles fertiles, de blé et d'orge, de production principale céréalière.

-Projet d'installation de plusieurs stations d'épuration dans plusieurs zones du bassin afin de protéger les eaux de ruissellement de la pollution.

-Agrandissement de la station d'épuration d'Ain Zadeh pour une plus grande utilisation de son eau.

-Des ouvrages hydrauliques importants sont dirigés vers ce bassin (barrage d'Ain Zada, sources)

### ***1.4 Habitats et activités :***

L'économie de est principalement liée au secteur primaire : 70 % des terres sont des terres agricoles. Le blé et l'avoine sont les principales productions de céréales. Une zone industrielle va être construite à cheval sur les territoires de Bir Kasdali, d'Aïn Taghrout . Cevital sera la première entreprise en y installant une usine de fabrication de fenêtres à double vitrage.

### ***1.5. Le relief :***

Le relief de la zone de étude , se divise en trois grandes zones :

#### ***1.5. a. Zone montagneuse :***

Cette zone occupe plus de 40% de la superficie de la zone de étude elle est bien représentée au Nord et au Sud.D'Ouest en Est, il s'agit des Biban de Zemmoura (1503 m), Djebel Guergour (1613 m).

#### ***1.5. b. Zone des hautes plaines :***

c'est une immense étendue, occupant 50% de la superficie totale de la zone de étude , elle est relativement plane et dont l'altitude varie de 950 m 750 m.

#### ***1.5. c. Zone de dépression Sud:***

Elle est située dans le Sud de la wilaya, où l'altitude dépasse rarement les 900 m. Cette zone pratiquement plane, elle couvre une superficie de 10% de l'espace de la zone de étude

### ***1.6.Démographie :***

Selon le recensement 2018 le nombre total d'habitants du bassin de l'Oued Bousselam était de 831 448 avec un taux de croissance de 2,20%

### Note:

Certaines des communautés du bassin ont connu une très forte croissance, atteignant le taux de 23,33% par exemple à Khalil, pour plusieurs raisons, notamment le facteur de sécurité qui a entraîné le déplacement massif de personnes des zones montagneuses vers les zones de plaine.

**Tableau I.1 :** Evolution de la population dans le bassin versant moyen d'oude bousselem.

	Nombre d'habitants			Nombre d'habitants		
	Plaines supérieures			La gamme suivante		
Années	2005	2010	2017	2005	2010	2017
<b>Grands rassemblements</b>	452942	546243	820291	155856	191276	302714
<b>Groupes secondaires</b>	128428	166407	286131	117933	143196	218301
<b>Zones éparses</b>	82215	103581	109339	83254	83781	86987
<b>Total</b>	663585	816231	1215762	357043	418253	608003

Toutes ces estimations montrent donc que l'augmentation de la population se fera d'avantage au niveau urbain. Dans les zones rurales, la population est plus concentrée dans les hautes plaines que dans les autres.

### ***I.7. Frontière :***

Limites du bassin

\*Au nord par la commune de Bougaa

\* A l'est par la commune de ain arnat

\* A l'ouest par la commune de ouled sidi amer

\* Au sud est par la commune de Tixter

\* Au sud ouest par la commune sid embarak

\* AU sud l'est par la commune mezloug

\*Au nord-est de la commune d'Ain Abbasah

\*Au nord-ouest de la commune d'Ain Abbasah

### ***I.8. Climatologie :***

Toute étude climatologique, hydrologique ou pluviométrique est basée sur l'exploitation de séries des données recueillies pendant des périodes plus ou moins longues continues ou discontinues (**Dubreuil, 1974**). En l'absence d'observations au niveau de la région étudiée nous avons utilisées les données recueillies de la station météorologique de Bejaia auxquelles nous avons appliqué la méthode de correction proposée par Seltzer en 1946 et décrite cidessous. La période d'observation pour les précipitations s'étale sur 48 ans (de 1970 à 2017) et pour les températures 40 ans (1978 à 2017).

#### ***I.8.1 Température :***

L'abaissement des températures maximales est de **0,65°C** pour une élévation de **100m** d'altitude et celle de minimales est de l'ordre de **0,4°C** pour la même élévation d'altitude. L'altitude maximale de notre zone d'étude est de l'ordre de **1674m** et l'altitude minimale est de **2m**. Ce qui signifie que l'altitude moyenne de notre zone d'étude est d'environ **836m**.

**Tableau I.2: Températures moyennes mensuelles de la région d'étude pour la période (1978-2017).**

MOIS	J	V	M	A	M	J	JU	A	S	O	N	D
T (°C)												
T max	11,15	11,62	13,28	15,01	17,53	21,03	24,13	24,88	22,79	20,07	15,42	12,27
T° min	4,14	4,33	5,69	7,49	10,63	14,33	17,33	17,91	15,8	12,56	8,44	5,33
T° moy	7,64	7,97	9,48	11,25	14,08	17,68	20,73	21,39	19,29	16,31	11,93	8,8

- T° max: Température maximale.

- T° min: Température minimale.

- T° moy :  $(T^{\circ} \text{max} + T^{\circ} \text{min})/2$  : Température moyenne.

Le tableau représente les données de températures minimales (T° min), maximales (T° max) et moyennes (T° moy) de la région d'étude. Il en ressort que le mois de janvier est le plus froid à une valeur 4.14 °C, alors que les mois de juillet et août sont les plus chauds à des valeurs 24.13°C et 24.88°C.

### ***1.8.2. Les précipitations :***

Les précipitations ont un rôle très important en région méditerranéenne. Elles sont caractérisées par leur régime irrégulier et leur répartition inégale (sécheresse de l'été). Elles se présentent essentiellement sous forme de pluie mais aussi sous forme de neige en période hivernale et au printemps (Sersoub, 2012).

Pour les précipitations, une élévation de **100m** d'altitude va engendrer un gradient pluviométrique de l'ordre de **40mm (Seltzer, 1946)**.

Les précipitations moyennes annuelles de Bejaia (**P<sub>an</sub>=783.85mm**).

Les précipitations moyennes annuelles corrigées du bassin versant Bousselam ( $P'_{an}=783.85+334.4=1118.25\text{mm}$ ).

Donc, le rapport **K= P<sub>an</sub> / P'<sub>an</sub>** est égal à 0.7 (**K=0.7**).

Les précipitations mensuelles du site de bassin versant Bousselam sont le résultat du produit des données brutes de la station de Bejaia par le coefficient **K=0.7**

**Tableau I.3: La répartition des précipitations moyennes mensuelles en (mm) de la station de Bejaia et notre région d'étude (1970-2017).**

Mois	J	V	M	A	M	J	JU	A	S	O	N	D	P(mm)
Bejaia	110.75	93.35	86.27	68.61	42.12	13.68	5.95	12.05	48.91	76.84	101.44	123.88	783.85
Bassin de Bousselam	77.52	65.34	60.38	48.02	29.48	9.57	4.16	8.43	34.23	53.78	71	86.71	548.62

Le régime pluviométrique de Bassin versant de Bousselam présente une certaine variabilité. La moyenne la plus basse est enregistrée durant le mois de Juillet avec **4.16mm**, alors que le mois le plus pluvieux est Décembre et Janvier avec des moyennes mensuelles de **86.71mm** et **77.52mm**

### ***1.8. 3.Synthèse des données climatiques :***

#### ***1.8. 3.1.Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gaussen :***

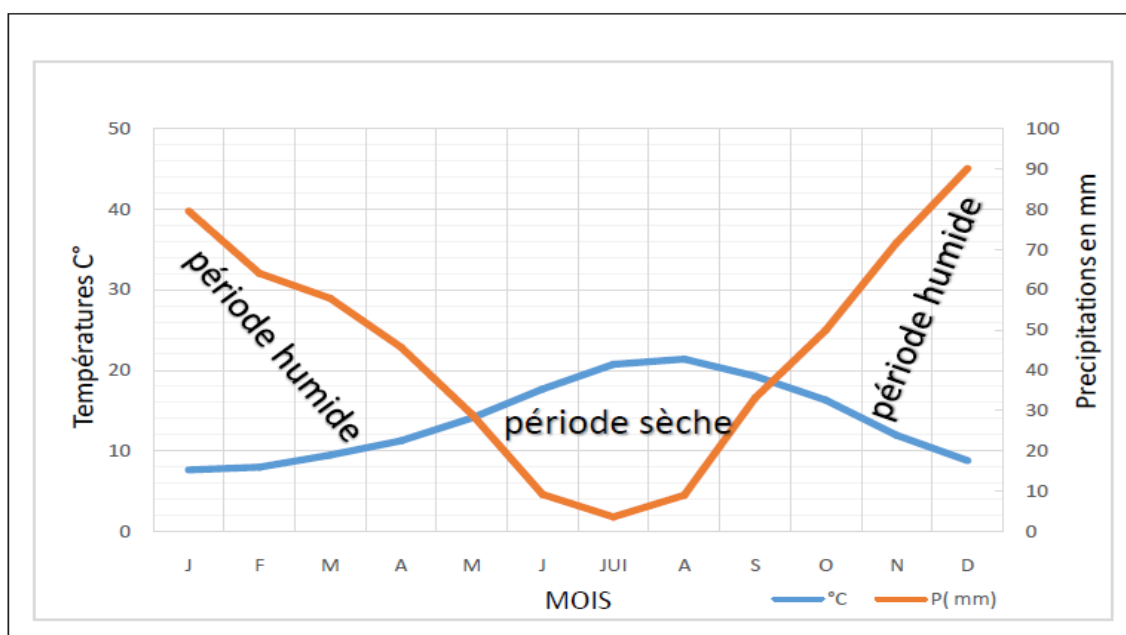
précipitations P, exprimé en mm, est égal ou inférieur au double de la température moyenne T, du mois, exprimée en degré Celsius. Partant de ce principe, la durée et l'importance de la période sèche peuvent être déterminées par le diagramme ombrothermique proposé par ces deux auteurs. Ce diagramme est obtenu par un graphique où les mois de l'année sont en abscisse, les précipitations moyennes mensuelles (P en mm), en ordonnée de

droite, les températures (T en degrés centigrades), en ordonnée de gauche et à une échelle double. La période sèche s'individualise lorsque la courbe des précipitations passe sous celle des températures, c'est à dire lorsque  $P < 2T$ .

**Tableau I.4:** les données climatiques corrigées (températures moyennes et hauteurs totales mensuelles des précipitations) d'après la station météorologique de l'aéroport de Bejaia(1978-2017).

Latitude N ( $36^{\circ} 43'$ ), longitude E ( $05^{\circ} 04'$ ) et altitude en m D'après Bagnouls et Gausсен (1957).

mois	J	F	M	A	M	J	JUI	A	S	O	N	D
T°C	7,64	7,97	9,48	11,25	14,08	17,68	20,73	21,39	19,29	16,31	11,93	8,8
P(mm)	79,45	64,09	57,84	45,72	29,07	9,19	3,62	8,98	33,17	49,95	71,65	90,06



**Figure n° I.4 :** diagramme Ombrothermique Bagnouls et Gausсен de notre zone d'étude (bassinversant Bousselam) (1978-2017).

Le diagramme pluviothermique obtenu montre l'existence de deux périodes. La période sèche débute dès la deuxième semaine du mois de Mai jusqu'à la fin du mois de septembre et la période humide commence le début d'octobre jusqu'au début du mois de mai.

### I.8. 3.2. Climagramme d'Emberger :

La classification bioclimatique la plus utilisée en Afrique du Nord et particulièrement en Algérie, est celle d'Emberger corrigé par Stewart, et cela en se basant sur les données de

températures et de précipitations. Le Climagramme d'Emberger est exprimé par la formule suivante

$$Q_2 = \frac{3.43P}{M - m}$$

P : Précipitation annuelle moyenne.

M : Maximum annuel moyen de la température.

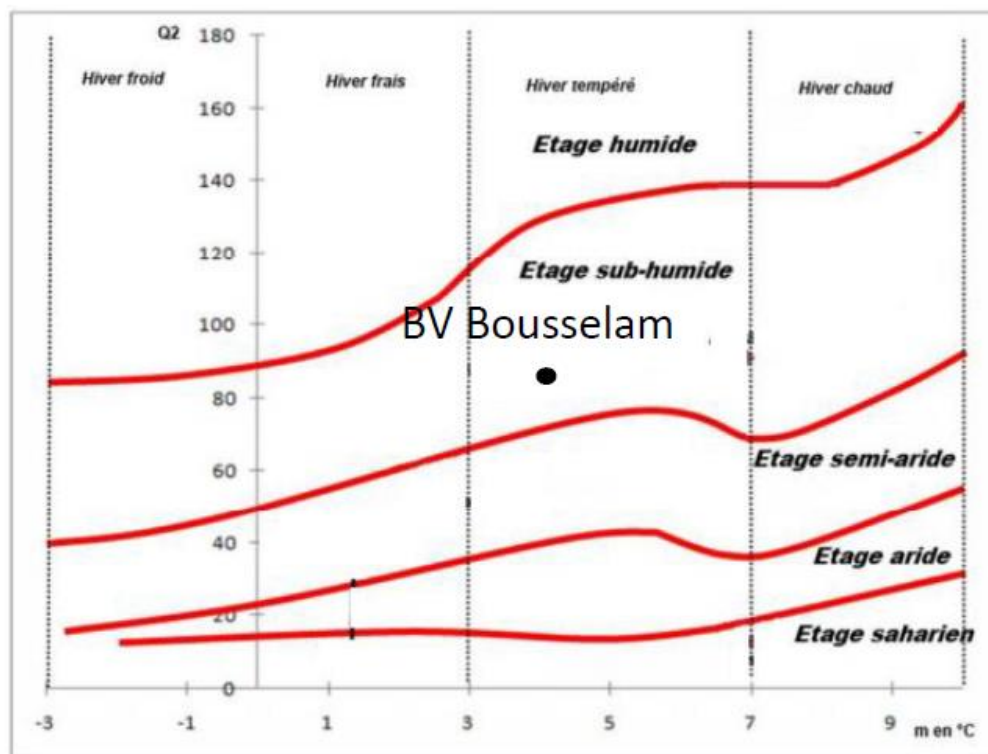
m : Minimum annuel moyen de la température.

— Calcul de  $Q_2$  pour notre région d'étude (bassin versant bousselam) :  $P=542.79\text{mm}$ ,

$M=24.88^\circ\text{C}$ ,  $m=4.14^\circ\text{C}$

$$Q_2 = \frac{3.43 \times 542.79}{24.88 - 4.14}$$

$$Q_2 = 89.76$$



**Figure n° I. 5:** classification climatique de la région d'étude d'après le diagramme d'Emberger

#### ***I.8.4 .Autres facteurs climatiques:***

La pluie et la chaleur sont les facteurs climatiques les plus importants pour le ruissellement dans le bassin.

##### ***I.8. 4.1. Humidité relative ;***

Elle représente le rapport entre la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air et la pression de saturation Bir Ali Kased à la même température, d'après les relevés de la station de (période 1990 – 2002), il apparait que le taux d'humidité le plus élevé est observé en hiver (77% en décembre).

**Tableau I.5 Répartition mensuelle de l'humidité relative**

<i>Mois</i>	<i>J</i>	<i>F</i>	<i>M</i>	<i>A</i>	<i>M</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>A</i>	<i>S</i>	<i>O</i>	<i>N</i>	<i>D</i>	<i>Moy</i>
<i>H Moy</i>	79,0 5	79,9 8	76,5 3	68,7 7	63,2 5	46,5 0	37,2 2	45,3 7	57, 2	69, 9	76,7 5	82,48	66,5
<i>H Max</i>	93,0 3	92,6	93,1	88,6	88,3	72,9	58,6	68,4	80, 2	88, 6	92,0	94,1	84,9
<i>Hmin</i>	60, 4	59,2	56,8	47,4	41,0	26,9	19,2	23,6	33, 4	47, 2	52,3 3	63,13	45,8

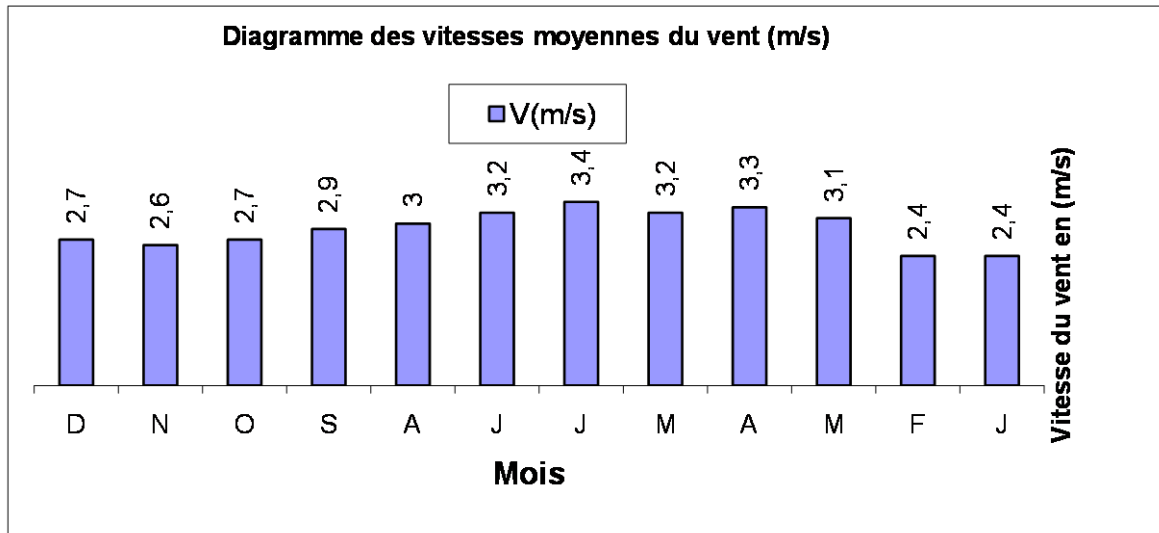
L'humidité se manifeste durant sept mois dans l'année soit du mois d'octobre au mois d'avril où les valeurs sont toutes supérieures à la moyenne annuelle. Le reste de l'année, notamment la période qui coïncide avec la forte température, l'humidité ne s'abaisse pas au-dessous de la valeur de l'humidité moyenne annuelle est de l'ordre de 35%.

- **Les vents :**

*Tableau I.6: Répartition mensuelle de la vitesse moyenne du vent (m/s)*

<i>Mois</i>	<i>J</i>	<i>F</i>	<i>M</i>	<i>A</i>	<i>M</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>A</i>	<i>S</i>	<i>O</i>	<i>N</i>	<i>D</i>	<i>Moy</i> <i>annuelle</i>
<i>V(m/s)</i>	2.4	2.4	3.1	3.3	3.2	3.4	3.2	3.0	2.9	2.7	2.6	2.7	2.9

Les vents à la station de **Bir Ali Kased** soufflent toute l'année d'une moyenne annuelle de 2.9 m/s, les plus fréquents sont les vents chauds du sud qui interviennent à partir du mois de Mai jusqu'au mois d'Août avec des fréquences varient entre 3.1 et 3.0 m/s.



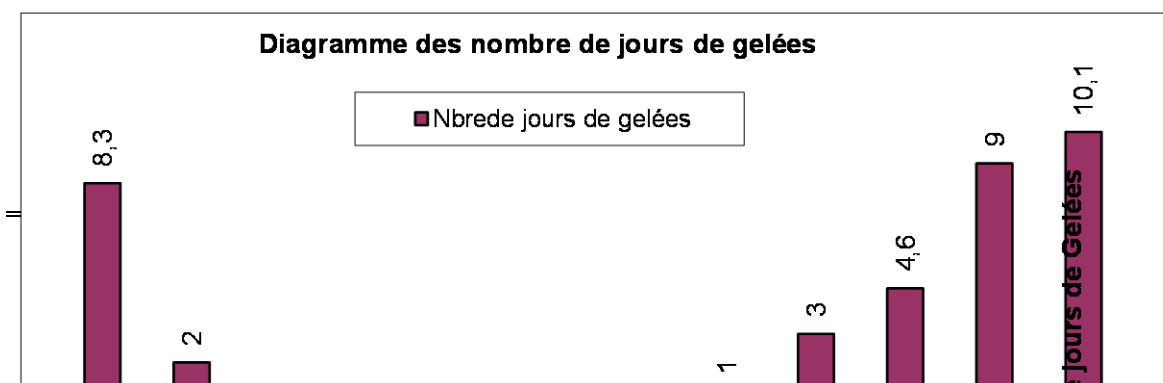
**Figure N° I.6:** Diagramme Des Vitesses Moyennes Du Vent (M/S).

- **Gelées:**

La connaissance de ce facteur climatique est très utile, car l'intervention de la gelée dans la zone provoque l'état de dormance de la végétation.

**Tableau I.7:** Répartition mensuelle du nombre de jours de gelées

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moyenne annuelle
Nbre de jours de gelées	10.1	9.0	4.6	3.0	1.0	-	-	-	-	-	2.0	8.3	38



**Figure N°I.7 :** Diagramme Des Nombres De Jours De Gelées.

A partir de ces données, on constate que la gelée se manifeste à partir du mois de Novembre jusqu'au mois de Mai.

La fréquence la plus élevée est enregistrée en mois de Janvier avec 10 jours et la moins élevée en mois de Mai avec 1 jour.

- **Neige:**

Tableau I.8: Répartition mensuelle du nombre de jours de neige.

<i>Mois</i>	<i>J</i>	<i>F</i>	<i>M</i>	<i>A</i>	<i>M</i>	<i>J</i>	<i>J</i>	<i>A</i>	<i>S</i>	<i>O</i>	<i>N</i>	<i>D</i>	<i>Moyenne annuelle</i>
<i>Nbre de jours de neiges</i>	2.6	4.0	2.0	1.0	-	-	-	-	-	-	-	3.5	13.1

Le nombre de jours ou elle a neigé, observé au niveau de la station de **Bir Ali Kased** est de 13 jours.

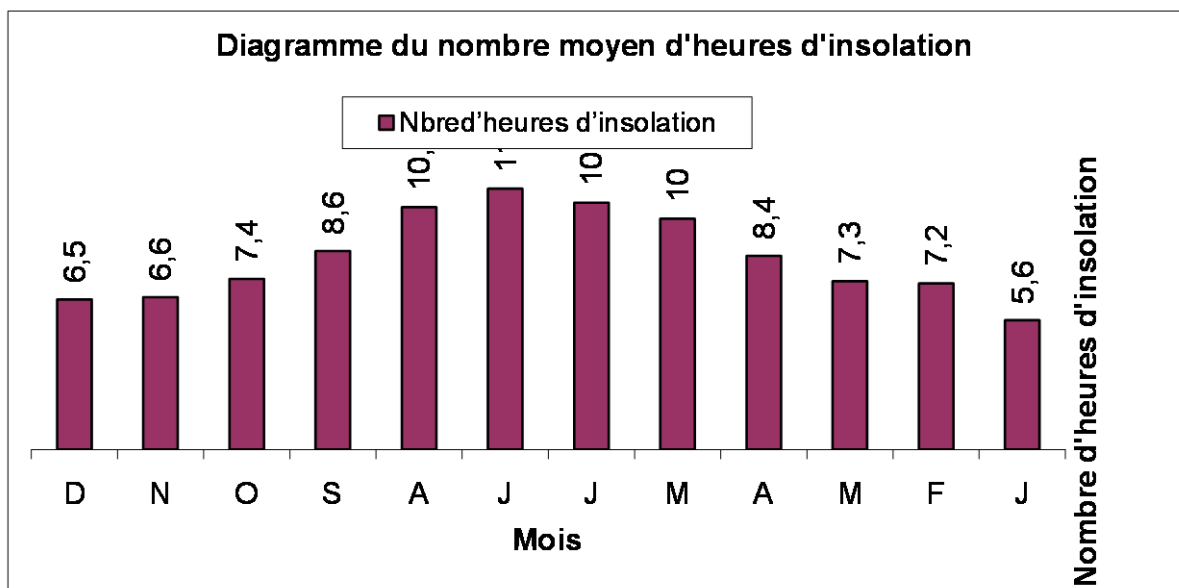
La chute de neige est fréquente en hiver et se prolonge jusqu'au printemps avec des valeurs variables.

- **Insolation**

L'insolation par définition est le nombre d'heures pendant lesquelles le soleil a brillé.

**Tableau I.9:** Répartition mensuelle du nombre d'heures d'insolation

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moyenne annuelle
Nbre d'heures d'insolation	5.6	7.2	7.3	8.4	10	10.7	11.3	10.5	8.6	7.4	6.6	6.5	8.34



**Figure n°I.8 :** diagramme du nombre moyen d'heures d'insolation

Les fréquences les plus élevées sont visibles en période chaude allant du mois Mai au mois d'Août avec un maximum de 11.3 heures au mois de Juillet.

Les valeurs inférieures à la moyenne annuelle sont enregistrées dans la période hivernale et printanière avec un minimum de 5.6 heures au mois de Janvier.

La moyenne annuelle du nombre d'heures d'insolation est de 8.34 heures.

### ***I.9 Caractéristiques morpho métriques et physiques du B.V :***

***1.9.1 Caractéristiques morphologiques :***

***a) Paramètres géométriques :***

***\*Surface :***

Le bassin versant est l'aire de réception des précipitations et d'alimentation des cours d'eau. Les débits vont donc être en partie reliés à sa surface, correspondant à l'aire délimitée par l'ensemble des points les plus hauts qui constituent la ligne de partage des eaux. Sa surface (A) exprimée en km<sup>2</sup>, peut être déterminée à l'aide d'un planimètre ou mieux par les techniques de digitalisation. (Par exemple les logiciels : (global Mapper – MapInfo) .

La surface du B.V Wade Bouslam été mesurée grâce au logiciel mapInfo Elle est de l'ordre 387 km<sup>2</sup>.

***\*Périmètre :***

Le périmètre représente toutes les irrégularités du contour ou de la limite du bassin versant, il est exprimé en km. Le contour du bassin est constitué par une ligne joignant tous les points les plus élevés. Il n'influence pas l'état d'écoulement du cours d'eau au niveau du bassin versant. Le périmètre peut être mesuré à l'aide d'un curvimètre ou automatiquement par des logiciels cités précédemment. Le périmètre du B.V Wadi Bouslam mesuré par "Map-info" est de 86.5km.

***\*Indice de compacité de Gravelius :***

L'indice de compacité (KG) renseigne sur la forme du bassin versant qui a une grande influence sur l'écoulement global du cours d'eau et surtout sur l'allure de l'hydrogramme à l'exutoire du bassin, résultant d'une pluie donnée. Il est établi en comparant le périmètre du bassin à celui d'un cercle qui aurait la même surface. Il s'exprime par la formule suivante (ROCHE, 1963) :

$$KG = \frac{P}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot A}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Avec :

*KG* : Indice de compacité de Gravelius

*P* : Périmètre stylisé en km du bassin versant

A : Superficie du bassin versant en km<sup>2</sup>.

Le coefficient de Gravelius du Wade Bouslam est de 1,231

D'après **KG** obtenu, le bassin versant Wade Bouslam est de forme allongée

Un bassin versant circulaire est mieux drainé qu'un bassin allongé.

KG =1	forme d'un cercle
KG=1.12	forme d'un carré
KG>1.12	forme d'un rectangle

***\*Courbe hypsométrique et diagramme de fréquence :***

Le relief est caractérisé par la courbe hypsométrique .Cette courbe est obtenue en portant en abscisses les surfaces partielles cumulées du bassin versant pour laquelle chaque point a une cote au moins égale à cette altitude et en ordonnées l'altitude considérées

Pour le bassin versant, Wade Bouslam le planimétrage des surfaces comprises entre les différentes courbes de niveau, est donné dans le tableau où sont représentés les surfaces cumulées et leurs pourcentages respectifs

La courbe hypsométrique représentée en Figure n° I. I.ure montre que 72,32 % de la surface totale du B.V est comprise entre les altitudes 800 et 1600 m.

Au dessous de 800 m le pourcentage des surfaces du B.V est très faible par rapport à la surface totale. Il est de l'ordre de 7,73 %.

Les altitudes au dessus de 500 m occupent une surface de l'ordre de 17.68%. D'après la courbe hypsométrique, on peut déduire que la pente est relativement assez moyenne.

A partir de cette courbe, on détermine :

\* l'altitude à 95% de la surface, HR95R = 1530 m

\* l'altitude à 5% de la surface,  $HR5R = 820m$

\* l'altitude médiane,  $H50 = 1000 m$

L'altitude moyenne est définie aussi par la formule suivante :

$$\bar{h} = \frac{\sum S_i \bar{H}_i}{S}$$

D'où :

S : surface totale du bassin versant

$S_i$  : surface partielle

$\bar{H}_i$  : L'altitude moyenne entre deux courbes niveaux

$\bar{h} = 1000 m$

Rectangle équivalent :

Le rectangle équivalent ou rectangle de Gravelius correspond à une transformation purement géométrique du bassin versant. Il prend alors une forme rectangulaire tout en gardant la même superficie, le même périmètre, le même indice de compacité et par conséquent la même répartition hypsométrique. Dans ce cas, les courbes de niveau deviennent parallèles aux cotés du rectangle équivalent. La climatologie, la répartition des sols, la couverture végétale et la densité de drainage restent inchangées entre les courbes de niveau. Plus un rectangle équivalent est allongé moins il sera drainé. Les dimensions du rectangle équivalent sont déterminées par les formules suivantes (ROCHE, 1963) :

La longueur  $L$  :

$$L = \frac{K_g \sqrt{A}}{1,12} \left[ 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1,12}{K_g} \right)} \right]$$

Pour application, la longueur du rectangle équivalent du B.V est de l'ordre de **24.9195Km**

La largeur  $l$  est : **18.3305Km**

**\*Les indices de pente :**

Le but de ces indices est de Caractériser les pentes d'un bassin versant et de comparer le bassin versant entre eux.

**a/Indice de pente Roche :**

## Chapitre I : PRESENTATION DU SITE D'ETUDE ET CONDITIONS NATURELLES.

ROCHE a proposé un indice de pente plus facile à calculer que le l'autre, il est donné par la formule :

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_i^n S_i (H_i - H_{i-1})$$

L : Longueur de rectangle équivalent (m)

Si : Surface partielle correspondante (%).

### ***b/Indices de pente globale :***

Les reliefs du bassin versant sont classés d'après cet indice suivant la classification de l'*orstom*

$I_g < 0.002$  ..... relief très faible.

$0.002 < I_g < 0.005$  ..... relief faible.

$0.005 < I_g < 0.010$  ..... relief assez faible.

$0.010 < I_g < 0.020$  ..... relief modéré.

$0.020 < I_g < 0.050$  ..... relief assez fort.

$$I_g = D / L$$

Où :

Ig : indice globale de Roche

D : dénivelée totale (m).

$$D = H_{95} - H_5 = 1530 - 820 = \mathbf{710 \text{ m}}$$

Donc l'indice de pente globale du bassin versant du Wade Bouslam est de :  **$I_g = 0.028$**

d'après Ig obtenu le B.V du Wade Bouslam est de relief assez fort.

Pente moyenne :

C'est une caractéristique importante des bassins versants qui renseigne sur la topographie du bassin. La pente moyenne du cours d'eau détermine la vitesse avec laquelle l'eau se rend à l'exutoire du bassin donc le temps de concentration. Elle influence sur l'état d'écoulement du cours d'eau au niveau du bassin versant. En effet, plus la pente est forte, plus la durée de concentration des eaux de ruissellement dans les affluents et le cours principal est faible, par conséquent le bassin réagira d'une façon rapide aux averses. Les pentes fortes à très fortes peuvent produire des écoulements de nature torrentielle qui sont à l'origine des crues dévastatrices.

La pente moyenne du bassin versant est donnée par ROCHE (1963) comme étant la moyenne pondérée des pentes de toutes les surfaces élémentaires pour lesquelles on peut considérer que la ligne de plus grande pente est constante. Une valeur approchée de la pente moyenne est alors donnée par la relation suivante :

$$P_m = \frac{1}{A} \sum D_i$$

Avec :

$P_m$  : Pente moyenne du bassin versant en ‰

$l$  : Largeur du rectangle équivalent en km

$D_i$  : Différence de niveau entre deux courbes consécutives

$A$  : Surface élémentaire en km<sup>2</sup>.

La pente moyenne du bassin versant du Boussaâda est de l'ordre de 31.05‰ Pour le calcul de cette pente moyenne, on ne tient pas compte de la forme de la courbe hypsométrique. Cette dernière correspond à la superficie entre les courbes de niveau en fonction des altitudes correspondantes. Elle donne une idée sur la pente et l'allure du relief.

### **\*.Longueur du cours d'eau principal :**

La longueur du cours d'eau principal est la distance curviligne depuis l'exutoire jusqu'à la ligne de partage des eaux, en suivant toujours le segment d'ordre le plus élevé. Lorsqu'il y a un embranchement et par extension du dernier jusqu'à la limite topographique du bassin versant, cette distance parcourue est exprimée en km. Si les deux segments à l'embranchement sont de même ordre, on suit celui qui draine la plus grande surface.

$$L_i = 21.5$$

Les caractéristiques du réseau hydrographique :

1. Densité de drainage :

La densité de drainage est la longueur totale du réseau hydrographique par unité de surface du bassin versant. Elle correspond pour un bassin versant donné de superficie A comme étant la longueur totale des cours d'eau d'ordre quelconque sur la superficie totale A du bassin versant. La densité de drainage est exprimée en km/km<sup>2</sup> ou en km<sup>-1</sup>.

Elle est donc :

$$D_d = \frac{\sum L_i}{A}$$

Avec :

$L_i$  : Longueur totale des cours d'eau en km

A : Superficie du bassin versant en km<sup>2</sup>.

La longueur totale des cours d'eaux du BV du Wade Bouslam est de :  $\sum L_i = 105$ . Km

Et leur surface A = 387 km<sup>2</sup>

$$\text{Donc : } D_d = 0.27 \text{ Km/Km}^2$$

La densité de drainage dépend de la géologie (structure et lithologie), des caractéristiques topographiques du bassin versant dans une certaine mesure, des conditions climatologiques et atmosphériques. En effet, les secteurs situés en zones de roches perméables ont en général des densités de drainage faibles, alors que les secteurs de roches imperméables ont des densités plus élevées

**\*Dénivelée spécifique (DS) :**

L'indice  $I_g$  décroît pour un même bassin, lorsque la surface augmente, il est donc difficile de comparer des bassins de taille différente, d'où la nécessité de l'introduction du paramètre (Ds).

$$D_s = D/L * \sqrt{A} \longrightarrow D_s = 254.16 \text{ m}$$

D'après la deuxième classification de l'ORSTOM (Office de Recherche Scientifique de Territoire d'Outre-Mer), la dénivelée spécifique du bassin de Wade Bouslam se trouve dans la classe R6 : caractérisée par un relief fort (tableau 03)

**Tableau. I.10.classification des Reliefs**

R1	Relief très faible	$05 < D_s < 10$ m
R2	Relief faible	$10 < D_s < 25$ m
R3	Relief assez faible	$25 < D_s < 50$ m
R4	Relief modéré	$50 < D_s < 100$ m
R5	Relief assez fort	$100 < D_s < 250$ m
R6	Relief fort	$250 < D_s < 500$ m
R7	Relief très fort	$500 < D_s < 750$ m

### **\*Temps de concentration (TC) :**

Le temps de concentration est défini comme étant la durée que met une goutte d'eau qui tombe dans le point le plus éloigné du bassin versant, pour atteindre l'exutoire. Il est exprimé par la formule suivante :

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1,54}{0,8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}}$$

On obtient : **Tc= 7.09heurs**

Avec :

A : Superficie du sous bassin = 387km<sup>2</sup> ;

Lp : Longueur du talweg principale = 21,50 km ;

Hmoy =1000m

Hmin = 800m

Vitesse d'écoulement de l'eau (Vc) :

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$V_c = \frac{L}{T_c}$$

Avec :

Vitesse d'écoulement de l'eau en m/s (Vc)

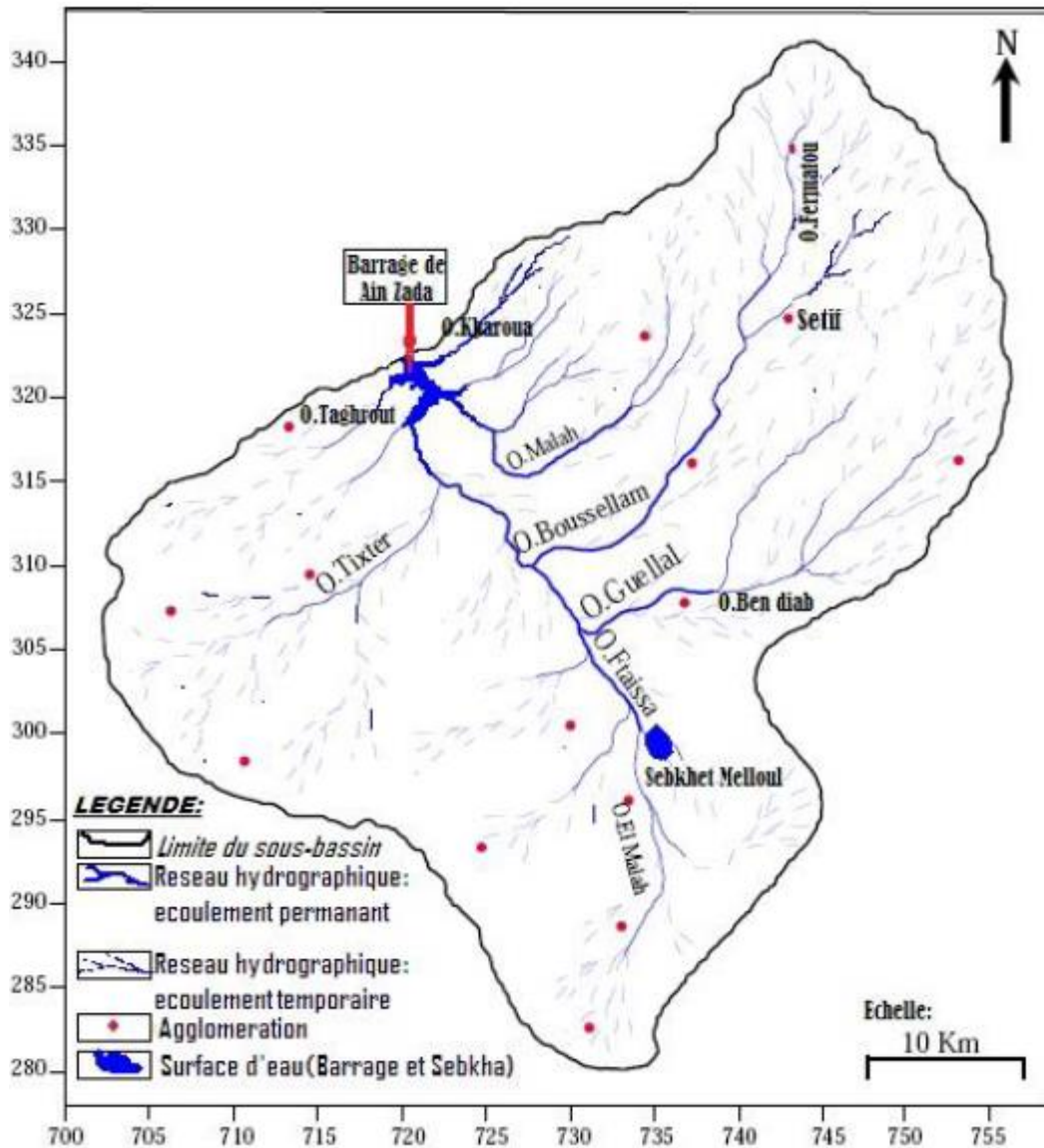
Langueur du talweg principal : 21,430 km = 21500 m (L)

Temps de concentration 3.43 heures = 12348 S (Tc)

**Donc :  $V_c = 3.04 \text{ m/s}$**

***1.10 Réseau hydrographique:***

Comme la majorité des cours d'eau d'Algérie ceux de la région d'étude, conséquence des précipitations, ont des écoulements irréguliers. Le réseau hydrographique est organisé autour du dispositif montagneux de la région. Dans la moitié Nord, l'écoulement des eaux de surface est les montagnes de bouгаа vers le barrage ain zada (les oudes qui se trouve de la région d'étude est o.khlill et o.oggar et o. tixter et o.kraoua) Ces réseaux hydrographiques alimentent les barrages et les retenues collinaires de la région.



**Figure n° I.9.** Carte du réseau hydrographique du sous bassin versant de Boussellam amont

**Tableau. I. 10.** Principales caractéristiques morpho-métriques du sous bassin versant Bousselem amont

## Chapitre I : PRESENTATION DU SITE D'ETUDE ET CONDITIONS NATURELLES.

<b>Caractéristiques morphométriques</b>	<b>Résultats</b>	<b>Unité</b>	<b>Observation</b>
Surface	387	Km <sup>2</sup>	-----
Périmètre	86.5	Km	-----
Altitude max	1540	M	-----
Altitude moyenne	1000	m	-----
Altitude min	800	m	-----
Indice de Gravelius	1,2311718	-----	forme d'un rectangle
Indice de pente globale	33.02	m/Km	relief assez fort
Longueur du rectangle équivalent	24.9195	Km	-----
Largeur du rectangle équivalent	18.3305	Km	-----
Longueur du cours d'eau principal	21.5	Km	
Pente moyenne	31.05	m/Km	-----
Dénivelée spécifique	254.16	m	-----
Densité de drainage	0.27	Km-1	Réseau moins dense
Temps de concentration	7.09	heures	
Vitesse d'écoulement d'eau	3.04	(m/s)	

### **I.11 Conclusion :**

La région de Bir Kasd Ali se caractérise par un climat continental semi-aride, avec des étés chauds et secs et des hivers froids et pluvieux.

## **Chapitre I : PRESENTATION DU SITE D'ETUDE ET CONDITIONS NATURELLES.**

Le bassin versant du Bir Kasd Ali draine une grande surface, de forme allongée, de relief modéré, de pente moyenne, d'une densité de drainage moins dense et de longueur du cours d'eau importante.

*Chapitre II : Analyse géologique et hydrogéologique.*

### II.1-Analyse Géologique :

#### II.1.1.Introduction :

Tout projet d'aménagement doit être précédé par une étude géologique du sol et sous sol et complétée par une étude géotechnique. Pour les glissements de terrain, la nature et la structure de la formation géologique sont considérées comme des facteurs de prédisposition pour le déclenchement de telle instabilité.

#### II.2 - Cadre géologique régional :

La chaîne Alpine d'Algérie s'articule sur le Rif et constitue la chaîne tello rifaine (Wildi, 1983) qui représente le segment occidental de la chaîne des Maghrébide (Durand Delga, 1980). L'édifice de cette chaîne résulte de la structuration du bassin magrébin et de ces marges, bassin qui se situe entre les marges continentales africaines et européennes. La chaîne Alpine d'Algérie se caractérise par des structures en nappe à vergence Sud et une unité orogénique remarquable du Nord vers le Sud on a:

- Le domaine interne.
- Le domaine de flyschs.
- Le domaine externe.

1) **Le domaine Interne** : est caractérisé par la dominance des affleurements de socle métamorphique de nature variée, comprenant localement des formations catazonales et des péridotites.

2) **Le domaine des flyschs** : il se caractérise par des formations abyssales mises en place par des courants de turbidité. Ces formations ont été subdivisées en trois groupes :

- Les flyschs de Guerrouch ou les flyschs Maurétaniens (proposé par Gelard, 1969) ;
- Les flyschs schisto-quartzeux ou albo-aptien « de Glangeaud, 1932 » ;
- Les flyschs Numudien.

3) **Le domaine externe** : en Algérie orientale, il est représenté par les séries telliennes, les séries de l'avant pays allochtone (selon les conceptions de Vila, 1980) et les séries de l'avant pays atlasique.

La région de Bougaa fait partie, selon cette subdivision, au domaine externe, plus exactement aux nappes telliennes. Ces nappes sont constituées par de plusieurs unités largement décalées les unes par rapport aux autres. Ces unités sont représentées de haut en bas selon Vila (1977) comme suit : (Figure n°. II-1, Figure n°.II-2)

- La nappe ultra tellienne : affleure trop mal, son état de dislocation montre l'existence de tectonique successive.

- La nappe de type Barbacha : cette nappe est jalonnée par des masses gypseuses triasiques.

- La nappe de type Beni Abdallah : sa genèse est le résultat d'une diverticulation. Le clivage se produit à la faveur d'une différence de compétence entre le Crétacé moyen marnocalcaire ou siliceux et le Crétacé supérieur entièrement marneux.

- L'unité supérieure à matériel éocène : Le développement en surface de cette unité supérieure est très remarquable. Le contact de base de cette unité cisaille les plis.

- La nappe Bibanique : correspond à une masse plissée isoclinalement dans des formations d'âge crétacé inférieur à crétacé supérieur. L'ensemble affecte l'allure d'un grand pli couché vers le Sud dont le flanc inverse est seul conservé à son extrémité orientale, au contact avec Dj. Guergour.

- **La nappe de Djemila** : couvre des surfaces considérables sur la moitié Nord Est. C'est la seule

## Chapitre II : Analyse géologique et hydrogéologique.

unité tellienne représentée par une série complète allant du Lias à la fin de l'Éocène.

- **L'unité inférieure à matériel éocène** : est localisée à l'Ouest au front de la nappe de Djemila.

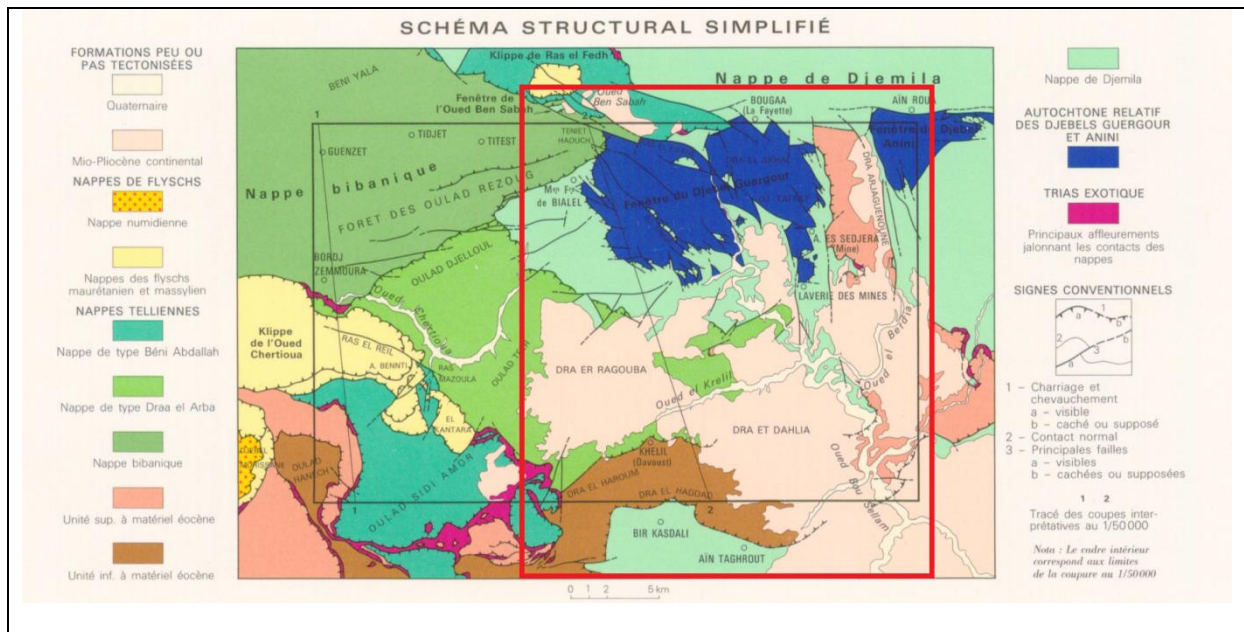


Figure n° II.1 Schéma structural simplifié

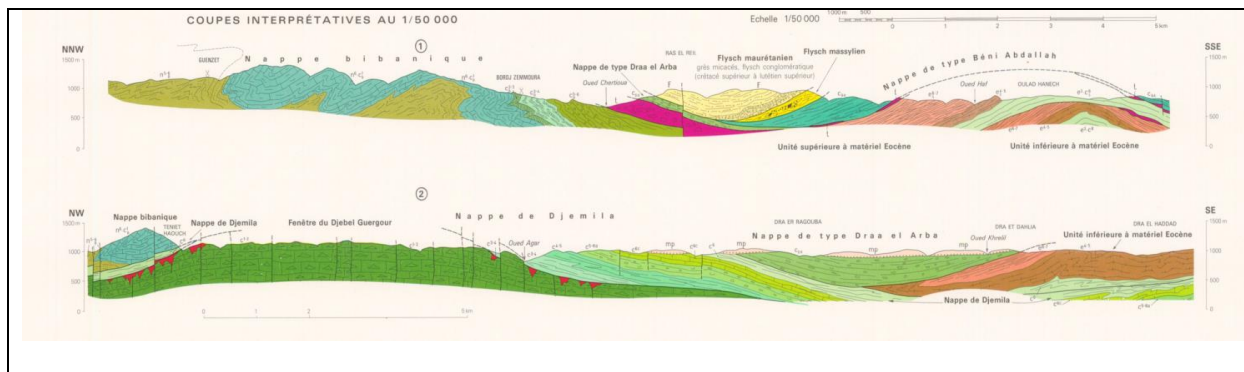


Figure n° II.2 coupes interprétatives.

Unité	Etage	Sous étage	Symbole	Figuré	Description lithologique	
Formation peu ou pas tectonisée	Quaternaire	Quaternaire récent	A		Sables, graviers, des limons englobent des gros blocs	
		Quaternaire ancien	Q		Terres arables, formations de pente et alluvions anciennes	
		Quaternaire ancien	e		Eboulis en blocs	
	Mio-Pliocène	Mio-Pliocène	mp		Argiles sableuses rouges et conglomérat mal cimenté	
Nappe de type Beni Abdellah	Crétacé	Sénonien	c BA		Marno-calcaires écaillieux noirs à lentilles de calcaires jaunes et marnes à intercalation de calcaires marneux à patine vert jade	
					Marno-calcaires écaillieux noirs à lentilles de calcaires jaunes et marnes à intercalation de calcaires marneux à patine vert jade	
Nappe de Djemila	Eocène	Eocène moy et sup	e6-7		Marnes noires, brunes et grises à blanc et à boules jaunes. Il peut atteindre 400m	
		Yprésien Lubétien inf.	e4-5		Calcaires massifs bitumineux blancs à boules jaunes. Il peut atteindre 150 à 200m d'épaisseur.	
	Paléocène	Paléocène	e2-3		Marnes noires ou brunes à rares boules jaunes, avec, au sommet des alternances de marnes grises et de marno-calcaires en petit bancs.	
		Danien	e1		Marnes noires et calcaires gris marneux à patine orangée	
	Crétacé sup.	Maastrichtien	c6		Marnes noires parfois à boules jaunes.	
		Campanien sup. à Maastrichtien	c6c		Calcaires, alternances de calcaires marneux gris et de marnes grises. Il peut atteindre quelques dizaines de mètres.	
		Coniacien sup. Santonien	c3-4		Marne grises et calcaire marneux.	
		Vraconien et Cénomanién inf.	n7-c1		Marnes, calcaires et conglomérat spartique à orbitolines	
	Nappe pétri tellienne du D.J. Héllal	Aptien à Cénomanién	-	K		Remplissage karstique anténappe d'oxyde de fer
			Cénomanién moy. à sup.	c1-m		Marnes verdâtres ou jaunes à rotalipores.
Albien à Cénomanién basal			n6-c1		Calcaires spartiques gris en gros blocs à orbitolines roulées avec intercalation marnieuses et calcaires noduleux à orbitolines au sommet.	
Aptien à Albien			n5-6		Pérites grises ou noire, schisteuses datée de l'Albien au sommet. Il peut atteindre 300m d'épaisseur.	
Autochtone relatif du D.J. Guergour	Crétacé inf.	Cénomanién et Turonien	c1-2		Dolomies et calcaires massifs spartiques.	
		Vraconien et Cénomanién inf.	n6-c1		Marnes dures à patine verdâtre, marnes noires esquilleuses et calcaires argileux gris	
		Aptien	n5		Alternance de calcaires microcristallines, de marnes grises sur 80m de base. Les 50m terminaux, au dessus, sont essentiellement marnieux avec des intercalations de niveaux calcaires et gréseux.	
		Barrémien	n4		Calcaires à la base et marnes au sommet	
		Néocomien	n1-3		Marnes schistoides	
	Jurassique	Jurassique	jD		Puissance assise dolomitique. (plus de 300m d'épaisseur)	
Trias	Trias	Trias	t		Argiles vari color et gypse broyé.	

Figure n°03 : cadre géologique local de la zone d'études

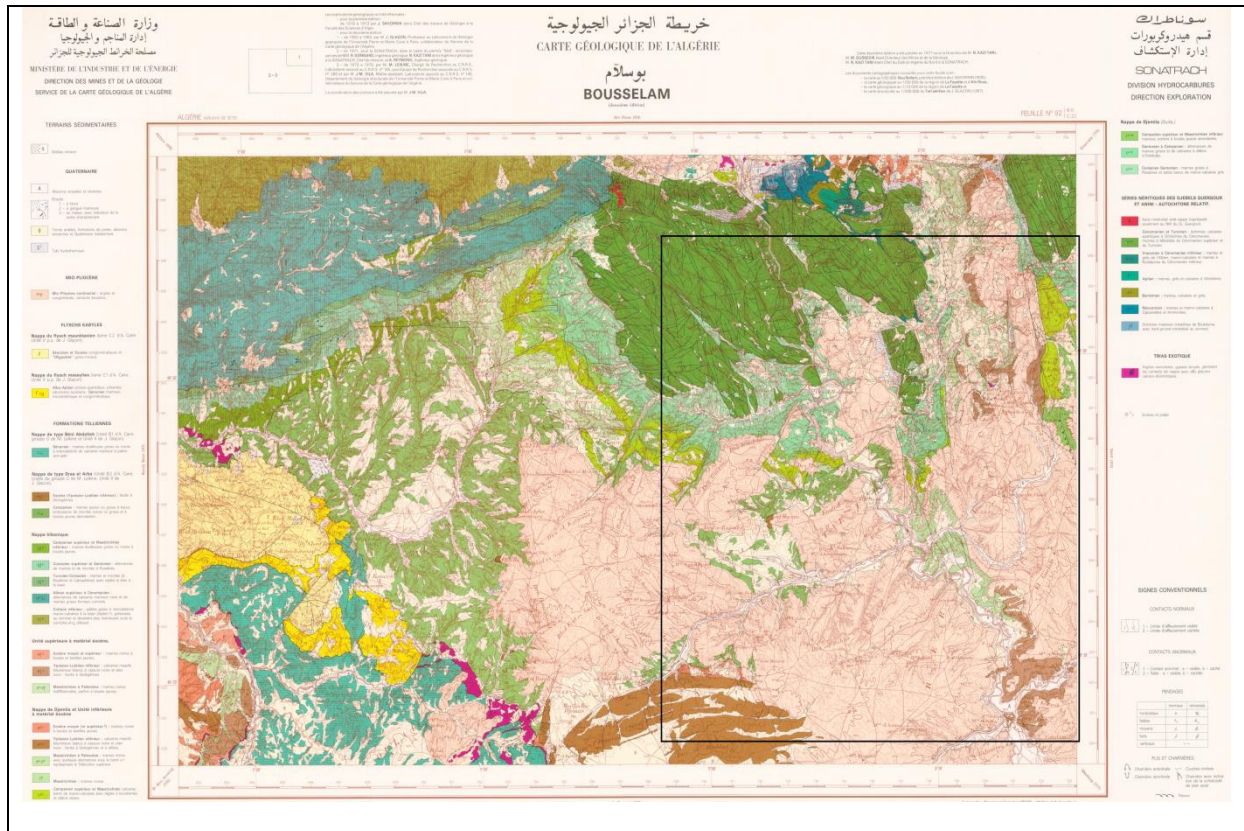


Figure n° II.4 carte géologie d'OUDE BOUSSLAM .

### II.3-Les aquifères potentiels:

Les différentes unités représentées dans la zone d'étude, sont classées, du point de vue hydrogéologique, comme suit :

**-Formations récentes du Quaternaire et du Mio-Pliocène :** marqué une formation de remplissage poste nappe, il s'agit en générale des alluvions et des formations de pente. C'est donc une formation meuble à granulométrie hétérogène et à perméabilité d'interstice très faible.

**-Formation de la nappe de Beni Abdallah :** peut constituer un aquifère au niveau de la formation des marnocalcaires.

**-Formation de la nappe de Djemila :** les formations carbonatées de l'Yprésien – Lutétien et de Campanien – Maastrichtien peuvent constituer un aquifère. Mais reste toujours que ces formations ne puissent développées d'important aquifère, vue le morcellement de ces formations et leur allochtonie.

**-Formation du Dj. Hallal :** seules les formations carbonatées de l'Albien à Cénomaniens peuvent être aquifères.

**-Formation du Dj. Guergour et Annini :** cette zone est constituée par un réseau de fracturation très dense et très complexe et par la présence d'un réseau karstique renferment

des sédiments ferrifères avec l'absence d'exutoire important. Tous ces critères assurent la présence d'un important aquifère en profondeur (Athemna, 2006)

### **II.4-Géologie de la zone d'étude:**

#### **II.4.1- Litho stratigraphie :**

Les formations géologiques rencontrées sont les suivantes :

##### **II.4.1.1- Quaternaire:**

- Quaternaire ancien (Q) : terres arables, formations de pente. Parmi les formations de pente nous distinguons

##### **$\alpha$ ) Les dépôts de pente fins (colluvions) :**

Graviers et cailloux. Ces dépôts colluviaux couvrent de grandes surfaces du versant, ils sont de Ils sont représentés par des argiles beiges, brunes à jaunâtres renfermant parfois des granulométries fines et très plastiques. Ce type de formation renferme souvent des graviers et cailloux dispersés ou encore de fragments rocheux de petites dimensions peu usés. Il présente une épaisseur très variable (2 à 20m). La perméabilité de ce type de formation est médiocre, la circulation d'eau peut s'effectuée entre les graviers et les fragments de roche

##### **$\beta$ ) Les alluvions anciennes :**

Elles couvrent l'étendue plate de long de l'Oued Kef Annser. Ces alluvions sont formées par des graviers et cailloux enrobés dans une matrice limono-argileuse.

##### **-Eboulis à blocs (e) :**

Ce sont des éboulis ancien fixés dans une gangue argileuse. La granulométrie de ces formations est très hétérogène et grossière, avec des éléments métriques fréquents alimentés par des affleurements de roches dures du Dj. Guer gour.

##### **-Nappe de Djemila :**

La seule nappe qui touche à notre zone d'étude est celle de Djemila. Les formations suivantes affleurent :

-Eocène moyen et supérieur ( $e^{6-7}$ ): marnes noires, brunes ou grises à bancs et boules jaunes.

-Yprésien Lutétien inférieur ( $e^{4-5}$ ) : calcaires massifs bitumineux clairs à cassures noires et silex noirs.

Pour ce site, quarante sondages carottés ont été réalisés dont la profondeur varie entre 12m et 20m. Et vingt neuf sondages sismiques, dont l'équipement utilisé est composé de :

-Un sismographe à un seul canal (monotrace).

-Des géophones.

-Un marteau sismique comme source d'énergie.

-Un dispositif long de 50m.

Ces sondages ont été transformés en coupes de la figure n°ure Figure n°. I-

Les coupes établies montrent que le sous sol est constitué par une formation d'argilite saine. Cette formation est surmontée par les formations détritiques à dominance argileuse.

### Tectonique :

#### Tectonique souple et tangentielle

Le schéma structural (Figure n°. I-5) présente un relevé des axes de pli et des charriages au niveau de la nappe de Djemila.

**Les anticlinaux et les synclinaux :** Trois familles de direction des axes de pli sont notables :

- a) **La famille E-W :** Cette direction est très fréquente au centre de la nappe de Djemila, elle-même remarquable plus au Sud à l'Ouest de Tadjenanet. Elle correspond à la torsion des structures plissées antérieures au charriage (Vila, 1980). Leur extension est de 4 à 10 Km.

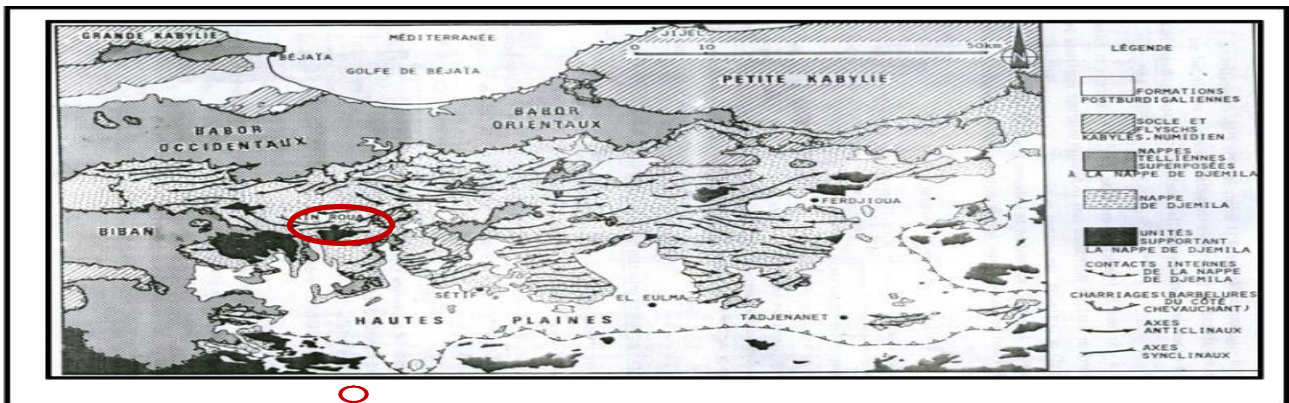


Fig. I-7 : Schéma structural simplifiée (Vila, 1980)

Figure n°.II.5 Schéma structural simplifiée.

a) **La famille NE-SW :**

Cette direction est remarquable aux extrémités de la nappe de Djemila. Au Nord-est l'extension des plis est remarquable et peut atteindre 23 Km.

b) **La famille NW-SE :**

Elle est très marquée au Nord-est et au Sud-ouest de la nappe. Leur extension est moins importante que la direction NE-SW.

### II.5- Les nappes de charriages :

Le schéma structural simplifié (Figure n°. II.5) montre la superposition des unités des charriages au sein de la nappe de Djemila.

a) On note que les deux unités des nappes des Babors et des Bibans sont superposées à la nappe de Djemila.

b) L'autochtone relatif supportant cet empilement de nappes telliennes est définie par l'ensemble sud sétifien et les monts du Hodna. Cet ensemble est daté du Jurassique au Crétacé. Il est surtout réparti au sud.



**Figure n° II.6 Carte de fracturation**

### **II.6- Tectonique cassante :**

La carte (Figure n°. II.6) de la fracturation, montre que les failles sont groupées en quatre familles.

#### **- Famille N à NW-S à SE:**

très marquées sur les calcaires massifs éocènes. Ces failles sont à faible rejet.

#### **-Famille E-W :**

cette direction est moins fréquente, affecte surtout les formations du Jurassique et du Crétacé du Dj. Guergour. Son extension est régionale.

#### **-Famille NE à SW et la famille NW à SE :**

sont deux directions conjuguées, datée post Eocène à grande rejet. La direction NW-SE est la plus fréquente. Elle est décrochant dextre. L'extension de la direction NE-SW est considérable et peut atteindre 12Km. Cette direction est décrochant senestre.

### **II.7 -Sismicité:**

Du point de vue sismicité et les risques que peut causer ce phénomène, l'Algérie est divisée selon l'intensité tellurique en quatre zones sismiques (Figure n°. I-). La ville de Bougaa se situe, selon les règles parasismiques algériennes, dans la zone IIa qui est une zone à activité sismique moyenne à forte.

Régionalement une réactivité sismique est enregistrée au niveau de la zone de Béni-Ouartilane en Novembre 2000 (NW de Bougaa). Cette secousse est enregistrée à 5° à l'échelle de Mercalli. Elle a provoqué des dégâts matériels. (CRAAG, 2004).

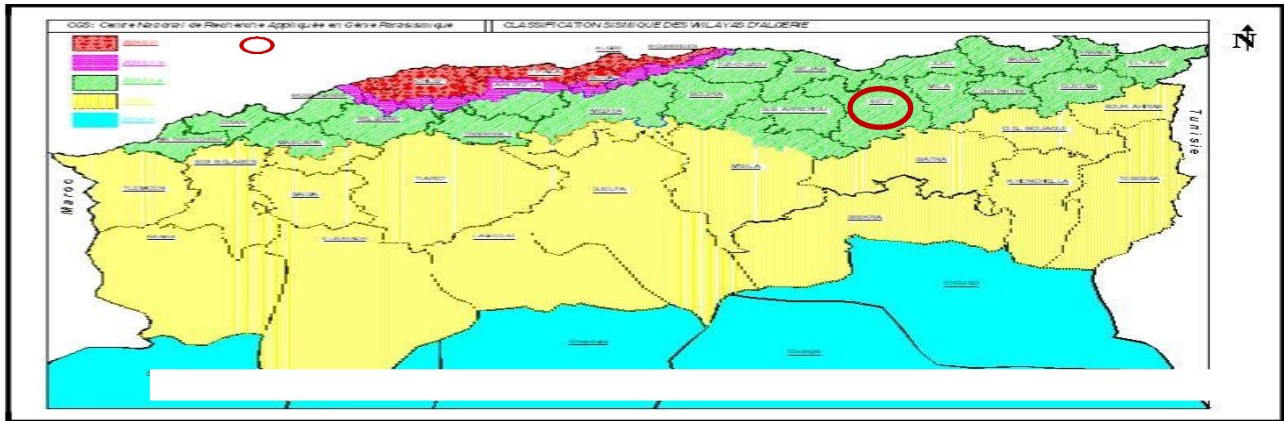


Figure n° II.7 Carte de zonage sismique de la Tunisie nationale.

### II.8 -Analyse Hydrogéologique:

#### II.8.1 -Introduction :

Outre la structure, la nature des formations et les conditions climatiques, l'eau souterraine est considérée comme l'un des facteurs déclenchants l'instabilité de terrain. Sur les pentes l'action de l'eau infiltrée est triple :

- Accroissement du poids volumique des sols par augmentation de la teneur en eau
- Changement de comportement rhéologique : le sol passe de l'état solide à l'état visqueux
- Action mécanique défavorable des pressions d'eau souterraine.

#### II.9 -Les unités hydrogéologiques du sous bassin versant d'Oued Boussemam:

La complexité structurale dans cette zone d'étude Nord ne permet pas le développement d'aquifères importants. La carte de lithologie (Figure n°. II-8) permet de classer les formations lithologiques du sous bassin versant d'Oued Boussemam en trois unités hydrogéologiques :

##### a) Formations à perméabilité d'interstice :

Sont représentées par les alluvions d'Oueds, les terres arables et les formations de pentes. Elles sont abondantes au centre du sous bassin versant.

##### b) Formations à perméabilité de fissure :

Sont représentées par des faciès carbonatés : calcaires, dolomie et marnocalcaire. Elles sont très abondantes au Sud. Plusieurs sources apparaissent à très faible débit (ne dépasse pas 0,5l/s).

### c) Formations de mauvaise perméabilité :

C'est essentiellement des marnes et des argilites saines. Elles sont très fréquentes sur la partie N du sous bassin.

Sur ce bassin versant, plusieurs sources, apparaissent surtout au Sud du bassin dont le débit oscille autour de 0,5 l/s, très fréquentes au Nord. Elles couvrent la moitié NW du bassin versant.

### II.10 -Etude de la piézométrie :

Afin d'étudier le comportement de la nappe alluviale, on a élaboré une carte piézométrique avec des données et mesures réalisées par les services de la direction des ressources en eau de la Wilaya de Bordj Bou Arreridj au niveau de 10 forages implantés dans l'aquifère superficiel, répartis d'une manière inégale à travers la plaine (Figure n° .II.8) et les données piézométriques ont été consignées dans le (Tableau II.1).\$

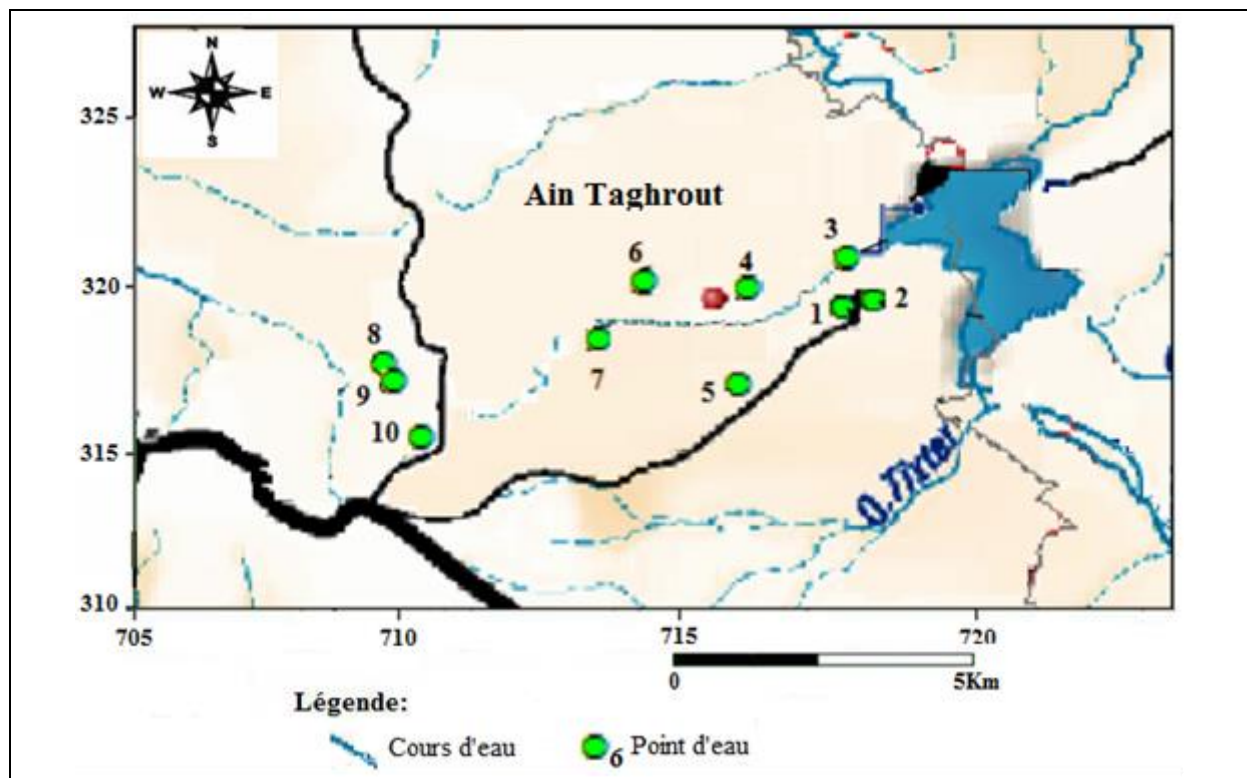


Figure n°. II.8 : Carte d'inventaire des points d'eau.

Tableau II.1. Inventaire des points d'eau :

Points d'eau	X (m)	Y(m)	Z(m)	Prof (m)	Np (m)	Q (l/s)
1	677855	400215	995	41	954	6
2	684375	4003677	988	52	936	10
3	678202	3999644	990	55	935	2
4	679025	3997608	994	60	934	5
5	684057	4001231	955	72	883	2
6	685380	4003247	969	53	916	4
7	692080	4002810	863	34	829	1,5
8	691252	4002405	890	30	860	2
9	691068	4002405	852	29	823	1,5
10	688216	3999630	936	64	872	2

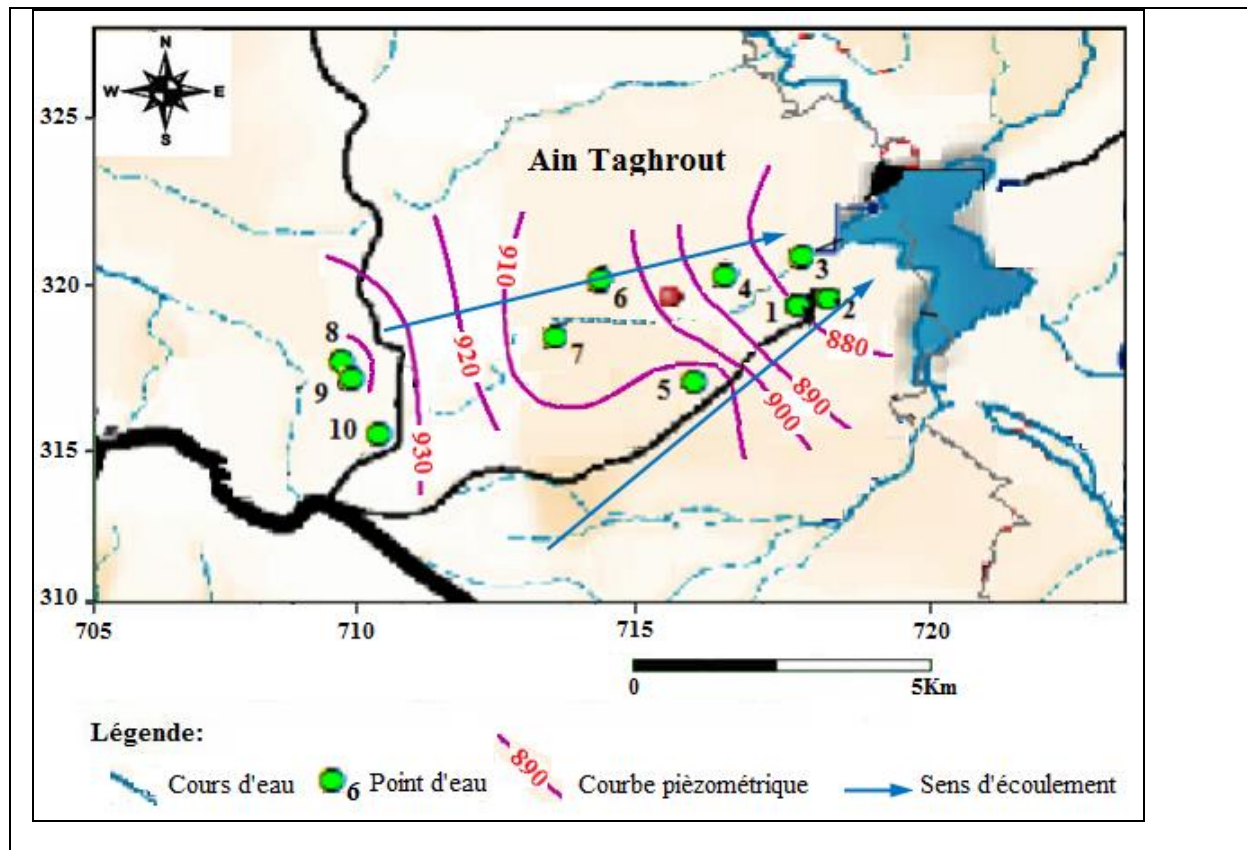


Figure n°.II.9 Carte piézométrique.

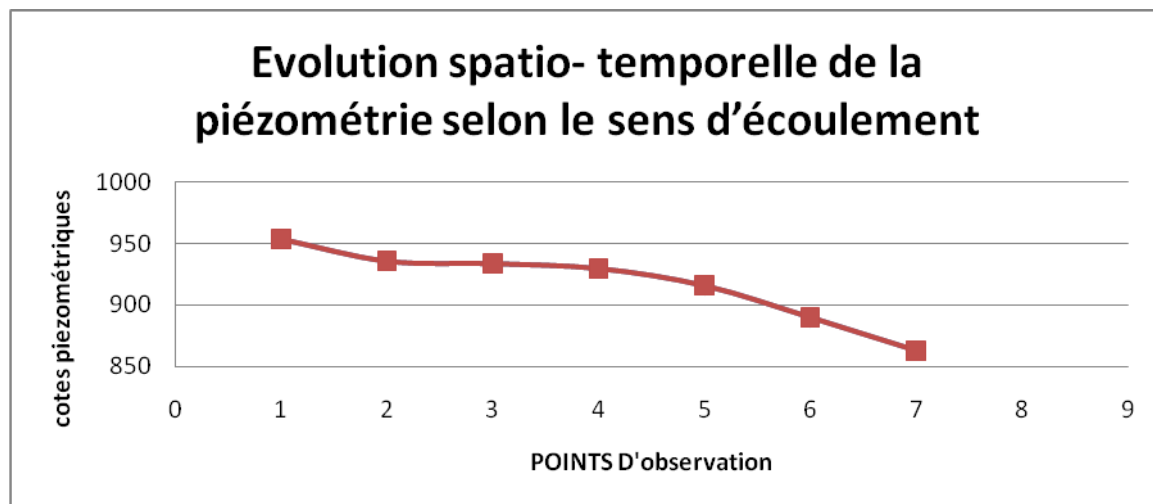


Figure n° .II.10: Evolution spatio-temporelle de la piézométrie selon le sens d'écoulement

### II.11-Les caractéristiques hydrodynamiques des formations aquifères

La détermination des caractéristiques hydrodynamiques des aquifères se fait par des essais de pompage. Ces essais consistent à représenter expérimentalement par des graphiques, les courbes et les droites des fonctions mathématiques régissant l'écoulement des eaux souterraines vers les ouvrages de captage. L'étude de ces graphiques permet :

- D'analyser l'évolution du cône de dépression de la surface piézométrique.
- De préciser les principales caractéristiques hydrauliques de la nappe.
- De déterminer les paramètres hydrodynamiques et en fin d'estimer les potentialités hydriques souterraines exploitables de la région

Les principales caractéristiques hydrodynamiques qui interviennent dans l'estimation du bilan hydrogéologique et des réserves en eaux souterraines se limitent à la transmissivité (T) et au coefficient d'emmagasinement (S).

✓ **Transmissivité :**

C'est le produit du coefficient de perméabilité (K) par l'épaisseur de la zone saturée h.

$$T \text{ (m}^2\text{/s)} = K \text{ (m/s)} \times h \text{ (m)}$$

✓ **Coefficient d'emmagasinement (S) :**

Il exprime le volume d'eau libéré ou emmagasiné à travers une section unitaire de l'aquifère (1m<sup>2</sup>), pour une variation unitaire de la charge hydraulique normale à cette section (Gilbert Castany, 1982).

Dans les nappes captives il reste lié aux taux de compression ; dans les nappes libres l'eau est libérée par l'action des forces de gravité (drainage). Le coefficient d'emmagasinement est

égal, en pratique, à la porosité efficace de l'aquifère ou les effets de compression sont négligeables. C'est un nombre sans dimension désigné par le symbole « S ». Les valeurs usuelles vont de 1% pour certains limons et jusqu'à 30 - 40% pour des alluvions grossières (Tableau n° II.2). La porosité efficace diminue avec la taille des grains, par exemple les sables présentant plus de porosité « fermée » que les graviers. Elle peut être déterminée en laboratoire ou sur le terrain, par égouttage de la roche (Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)).

**Tableau II.2 :** Quelques ordres de grandeurs des valeurs de la porosité totale et efficace (BRGM)

Type de sol	Porosité totale	Porosité efficace
Sables	20 à 40 %	10 à 25 %
Craie	10 à 40 %	1 à 5 %
Calcaires massifs fissurés	1 à 10 %	1 à 5 %
Argiles	40 à 50 %	1 à 2 %

Pour connaître les caractéristiques et le comportement hydrodynamiques de l'aquifère du Quaternaire de la région de de Wadi Bou Salam, une étude a été réalisée grâce à des essais de pompage sur quelques forages implantés par les services des directions des ressources en eau (D.R.E) des Wilaya Bordj Bou Arreridj).

L'essai à blanc nous a permis de déterminer le débit d'exploitation et d'observer la remontée jusqu'à atteindre le niveau statique de la nappe. Les mesures sont relevées dans les forages en cours de pompage.

### **II.11.1-Méthodes des essais de pompages et interprétation des résultats:**

L'interprétation des données et résultats des essais de pompage (rabattements et temps), repose sur des méthodes graphiques d'approximation exprimée par des expressions d'hydrodynamiques en régime transitoire, établies par Theis (1935) et ses successeurs Wenzel (1942) et Jacob (1950)...En 1935 Theis établit les expressions de l'écoulement de l'eau souterraine vers les ouvrages de captage, dites en régime transitoire où le temps de pompage est court, l'expression générale ainsi établie est la suivante :

### II.11.2 -Méthodes des essais de pompages et interprétation des résultats:

L'interprétation des données et résultats des essais de pompage (rabattements et temps), repose sur des méthodes graphiques d'approximation exprimée par des expressions d'hydrodynamiques en régime transitoire, établies par Theis (1935) et ses successeurs Wenzel (1942) et Jacob (1950)...En 1935 Theis établit les expressions de l'écoulement de l'eau souterraine vers les ouvrages de captage, dites en régime transitoire où le temps de pompage est court, l'expression générale ainsi établie est la suivante :

$$\Delta = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du, \quad \text{ou} \quad \Delta = \frac{Q}{4\pi T} [W(u)]$$

$\Delta$  : Rabattement observé à l'instant « t » dans le puits d'observation en mètre.

$$W(u) : \text{Est la fonction caractéristique où : } u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

T : Transmissivité en m<sup>2</sup>/s.

S : Coefficient d'emménagement (sans unité).

r : Distance du sondage d'observation à l'axe du puits de pompage en mètre.

Q : Débit de pompage constant dans le puits en m<sup>3</sup>/s.

t : Durée de pompage (le temps écoulé à un instant donné depuis le début du pompage, en secondes).

Jacob en 1950 a établi une nouvelle expression inspirée de celle de Theis. Cette expression dite logarithmique est utilisable lorsque le temps de pompage croit (devient assez grand) et que r décroît.

$$\Delta = \frac{0,183Q}{4\pi T} \left( \log \frac{4Tt}{r^2 S} - 0,577216 \right) \quad d'où, \quad \Delta = \frac{Q}{4\pi T} \log \frac{2,25Tt}{r^2 S}$$

Après solution numérique et logarithmiques décimaux l'équation de Jacob s'écrit :

$$\Delta = \frac{0,183Q}{T} \log \frac{2,25Tt}{r^2 S}$$

Cette formule simplifiée de Jacob est la plus utilisée donne une solution d'autant plus proche de la courbe de dépression réelle à l'instant  $t$  que  $x$  est plus petit et elle comporte deux parties :

- **Partie -1- lors de la descente :**
- ❖ **Calcul de la transmissivité :**

Soit l'équation de Jacob lors de la descente

$$\Delta = \frac{0,183Q}{T} \log \frac{2,25Tt}{r^2S}$$

On reporte sur un papier semi-logarithmique les valeurs mesurées sur le terrain, en abscisses les logs des temps et en ordonnée les rabattements correspondants  $[\Delta = f(\log t)]$ . La droite passant par les points obtenus a pour équation :

$$\Delta = \frac{0,183Q}{T} (\log \frac{2,25T}{r^2S} + \log t)$$

Après le développement on obtient l'expression suivante :

$$\Delta = \frac{0,183Q}{T} \log t + \frac{0,183Q}{T} \log \frac{2,25T}{r^2S}$$

C'est l'équation d'une droite de la forme :  $y = a x + b$ , avec

$$\begin{cases} y = \Delta & a = \frac{0,183Q}{T} = \operatorname{tg} \alpha = \frac{dy}{dx} \\ x = \log t & b = \frac{0,183Q}{T} \log \frac{2,25T}{r^2S} \end{cases}$$

La transmissivité est calculée par la pente de la droite représentative qui est déterminée par l'accroissement des rabattements, au cours d'un module logarithmique, noté  $a$ .

La transmissivité est calculée par l'expression suivante :

$$C = \frac{\delta \Delta}{\delta \log t} \quad \text{Ce qui donne} \quad T = \frac{0,183Q}{C}$$

- **Partie -2- lors de la remontée :**

On utilisé l'expression suivante :

$$\Delta_r = \frac{0,183Q}{T} \log \frac{t}{t'}$$

Avec :

$\Delta_r$  : Rabattement résiduel mesuré à un instant donné pendant la remontée, en mètre.

t : Temps écoulé depuis le début du pompage, en secondes.

t' : Temps écoulé depuis l'arrêt du pompage (temps de remontée).

**- Application de la Méthode de Jacob**

Cette méthode nous a permis de déterminer que la transmissivité T , car les mesures ont été effectuées dans les forages en cours de pompage et non au niveau de piézomètre Les résultats obtenus sont portés sur le (tableau).

N ° du point d'eau	Transmissivité (m <sup>2</sup> /s) Cas de la descente (x 10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> /s)	Cas de la remontée	Epaisseur utile (m)	Perméabilité (10 <sup>-4</sup> m/s)
1	10,16	1.16*10 <sup>-3</sup>	31	0.32
2	21,35	1.96*10 <sup>-3</sup>	42,8	0.5
3	11,43	1.03*10 <sup>-3</sup>	35	0.32

**II.11- Essai de pompage – courbes de descente et remontée**

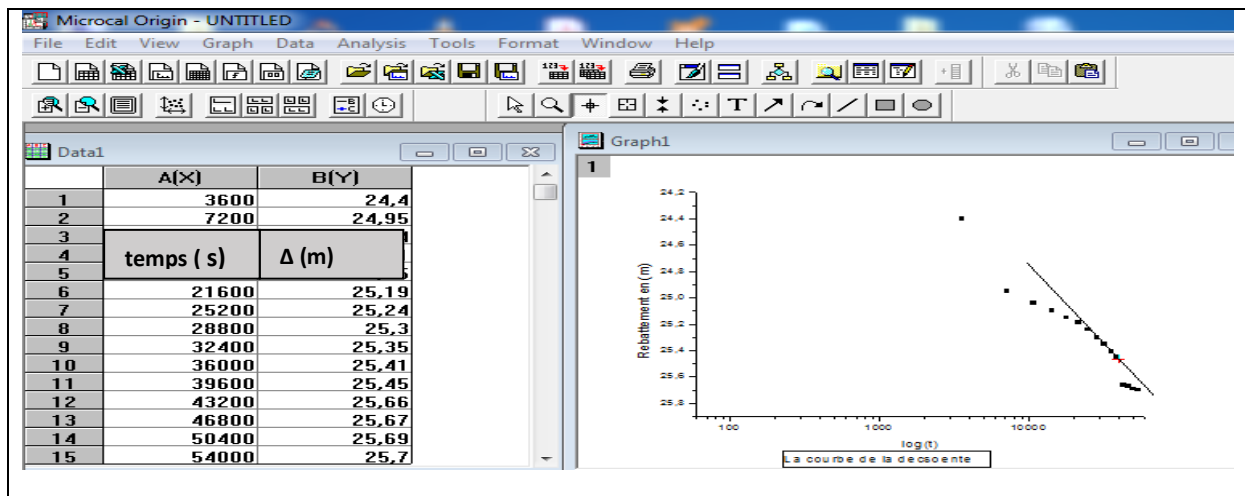


Figure n° II.11 La courbe de la descente.

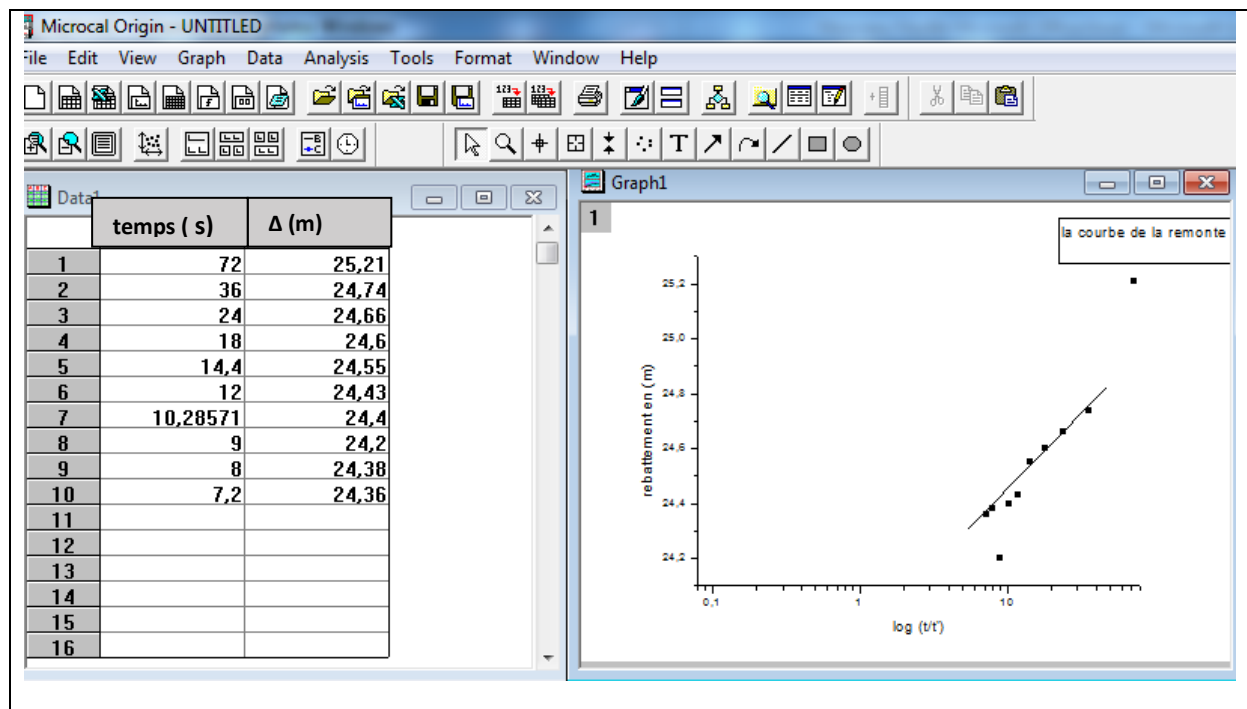


Figure n° II.12 La courbe de la remontée.

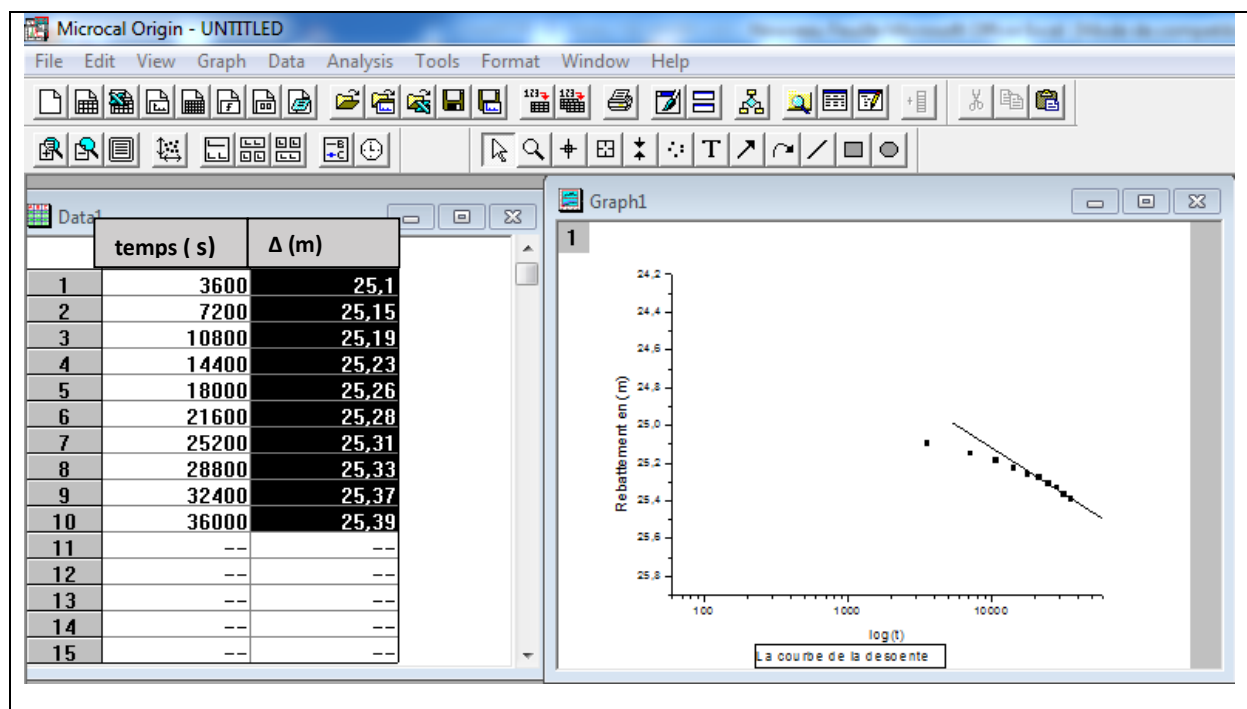


Figure n° II.13 La courbe de la descente.

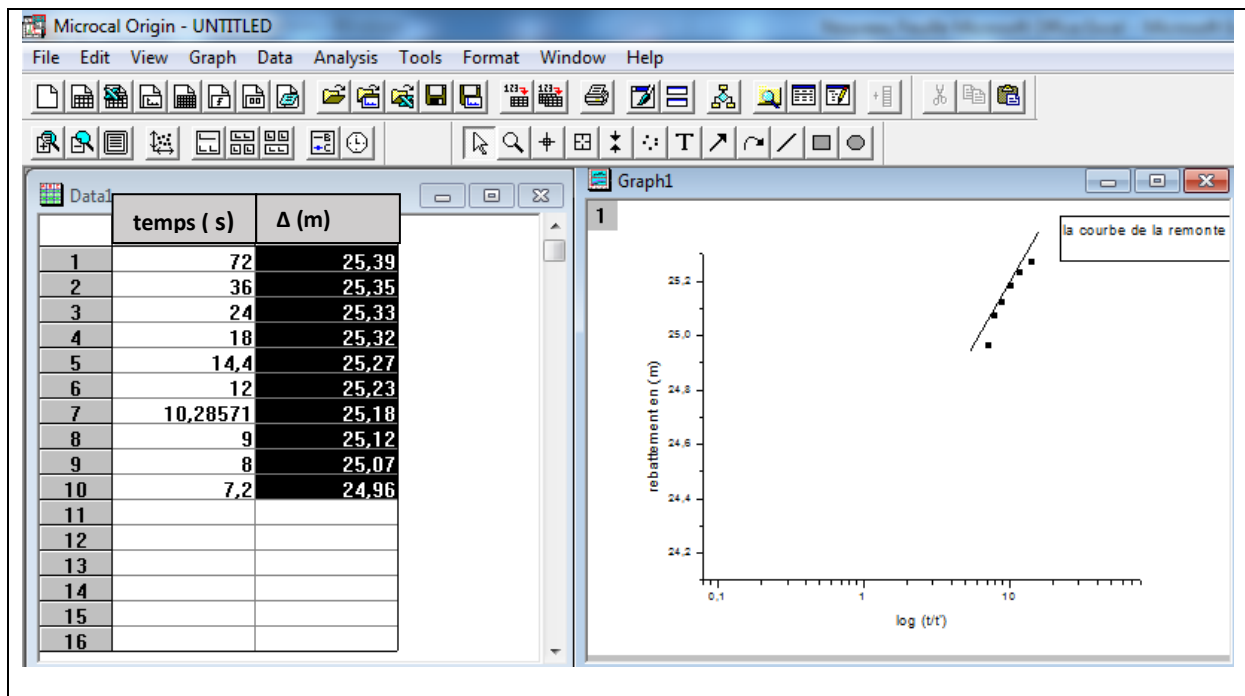


Figure n° II.14 La courbe de la remontée.

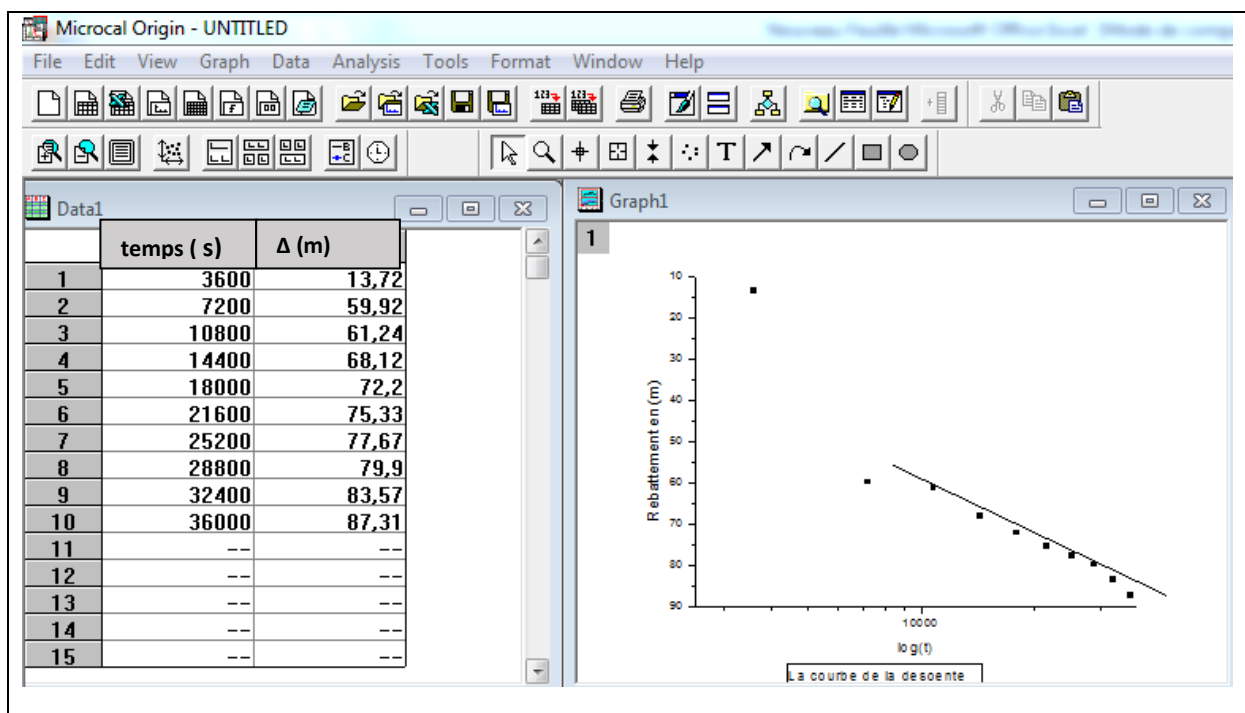


Figure n° II.15 La courbe de la descente.

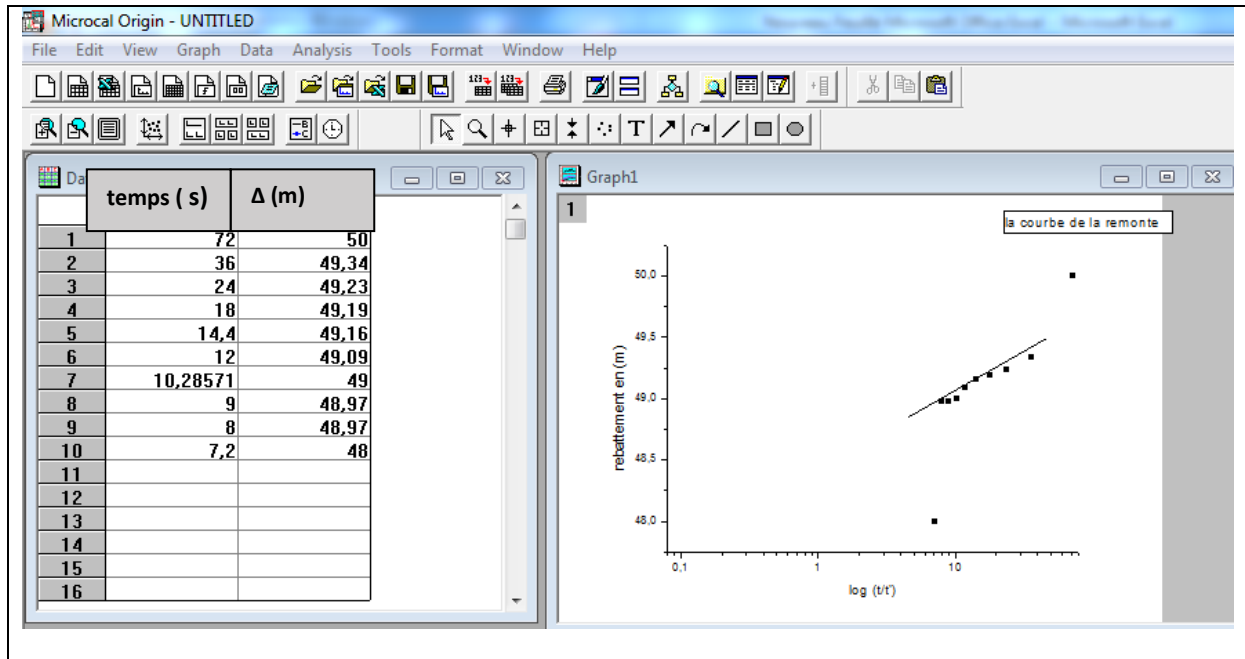


Figure n° II.16 La courbe de la remontée.

### II.12 -Détermination de la porosité efficace par la méthode d’Archie:

La porosité efficace est le rapport du volume d’eau gravifique au volume total de la roche . Dans le cas des nappes libres , elle est pratiquement équivalente au coefficient d’emmagasinement

Archie a établi une formule liant la résistivité d’un terrain de porosité efficace  $\phi$  ,à la résistivité de l’eau dont il est imprégné.

La relation s’exprime par : 
$$F = \frac{Rt}{Rw}$$

Avec :

F : Facteur de formation

Rt : Résistivité de l’aquifère

Rw : Résistivité de l’eau contenue dans le terrain

La relation établi par Archie entre la porosité efficace brute et le facteur de formation

s’ecrit :  $F = a \cdot \phi^{-m}$

a : paramètre ,  $0,8 \leq a \leq 1$  (0,8 pour les sables et 1 dans le cas des formations compactes.

m : Coefficient variant de 1,35 pour les formation compactes) à 2.

La valeur du coefficient  $a$  et celle de l'exposant  $m$ , étant différentes selon les auteurs, nous avons simplifié l'équation en posant :

$$a=1 \text{ et } m=2$$

$$F = \frac{Rt}{Rw} = \frac{1}{\phi^2} \Rightarrow \phi = \sqrt{\frac{Rw}{Rt}}$$

$\phi$  : Etant la porosité efficace ou coefficient d'emmagasinement.

La porosité efficace brute calculé, doit être corrigée par un coefficient de correction, correspondant au rapport entre la hauteur de l'aquifère saturé d'eau et l'épaisseur de l'aquifère non argileux.

**Tableau II.4 :** valeurs de la porosité efficace d'après la méthode d'Archie.

Point d'eau	RW (ohm.m) $\times 10^{-3}$	RT (ohm.m)	Porosité efficace Brute	Coefficient de Correction	Porosité efficace vraie ou coefficient d'emmagasinement
1	0,97	100	0.01	0.51	0.005
2	1,02	150	0.006	0.32	0.002
3	0,7	75	0.019	0.44	0.008

### II.13- Conclusion :

Dans cette étude hydrogéologique on est intéressé à l'aquifère superficiel, constitué essentiellement par des formations du Quaternaire qui recouvre la majorité de la zone d'étude caractérisé par des glacis polygéniques (argiles, graviers, Sables et galets), alluvions, limons, marnes, conglomérats cimentées et croutes calcaire. L'alimentation de cet aquifère se fait principalement par les précipitations sur l'impluvium des plaines en périodes d'averses.

L'aquifère est capté par un nombre élevé de puits et forages qui se répartissent sur l'ensemble du système aquifère. Comme il est en relation avec les aquifères profonds (en certains endroits),

L'analyse des cartes piézométriques de notre zone d'étude montre :

Les zones correspondantes à des horizons à fort écoulement avec les directions de l'écoulement S-N et E-W, l'alimentation de l'aquifère superficiel se fait à partir des massifs qui bordent les plaines de où les axes d'écoulement prennent naissance. Ces écoulements sortent vers le Nord-Est par l'intermédiaire d'un axe de drainage. Ainsi, se convergent vers

une zone de dépression qui représente l'exutoire principal de l'aquifère et en même temps une limite à potentiel imposé.

Les valeurs du gradient hydraulique sont peu variables dans la même direction de l'écoulement. Ils ont une valeur moyenne de 16‰ au centre des plaines, de 17,3‰ au Sud et au Nord,

Les essais de pompage, nous a permis d'estimer les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère et d'estimer les potentialités hydriques souterraines :

La transmissivité moyenne de l'ordre de  $T = 3.04 \cdot 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s, la perméabilité moyenne de  $0.38 \cdot 10^{-4}$  m/s et le coefficient d'emmagasinement (porosité efficace) moyen de .

*Chapitre III : Modalisation.*

### **III. Introduction :**

La modélisation mathématique consiste à traduire un phénomène réel à l'aide d'outil mathématique. Les équations régissant les écoulements souterrains bidimensionnels à partir desquelles les équations en milieu poreux, homogène, isotrope et en régime permanent sont présentées. Ensuite, la résolution des équations unidimensionnelles, non linéaires de Barré de Saint Venant régissant les écoulements à surface libre en eau peu profonde sont obtenues par application des deux principes de la dynamique qui sont la continuité et la conservation de la quantité de mouvement à l'aide de certaines hypothèses simplificatrices. Puis, la forme vectorielle conservative de ces équations est écrite. Pour finir, le couplage d'écoulement de surface et souterrain est détaillé.

#### **III.1 Présentation du Modèle COMSOL Multi physique :**

##### **III.1.1 Définition :**

Le logiciel COMSOL Multiphysiques, anciennement appelé FEMLab, est avant tout un outil de résolution d'équations aux dérivées partielles par éléments finis. Sa particularité est de disposer d'une base de données d'équations permettant de modéliser différents phénomènes physiques, comme l'électrostatique, l'écoulement de fluides ou encore la déformation des matériaux.

Développé initialement comme une toolbox de Matlab, il dispose aujourd'hui de son propre environnement graphique permettant à la fois le dessin des géométries et l'affichage de résultats en post-traitement. Sa spécificité est également de permettre de coupler différentes EDP, de manière à décrire des phénomènes multiphasiques. Il est ainsi possible d'obtenir la déformation d'une membrane due à la pression dans un liquide par exemple.

COMSOL Multiphysics a été développé par des étudiants de **Germund Dahlquist** à la Royal Institute of Technology à Stockholm en suède. La première version de COMSOL Multiphysics est sortie en 1998.

### **III.1.2 La méthode des Eléments Finis :**

La méthode des Eléments Finis consiste à approcher, dans un sous-espace de dimension finie, un problème écrit sous forme variationnelle dans un espace de dimension infinie. Cette forme variationnelle est équivalente à une forme de minimisation de l'énergie en général (principe des travaux virtuels). La solution approchée est dans ce cas une fonction déterminée par un nombre fini de paramètres, par exemple, ses valeurs en certains points (les nœuds du maillage).

Cette méthode est particulièrement bien adaptée aux problèmes d'équilibre. Elle permet de traiter des géométries complexes contrairement aux Différences Finies mais elle demande un grand coût de temps de calcul et de mémoire.

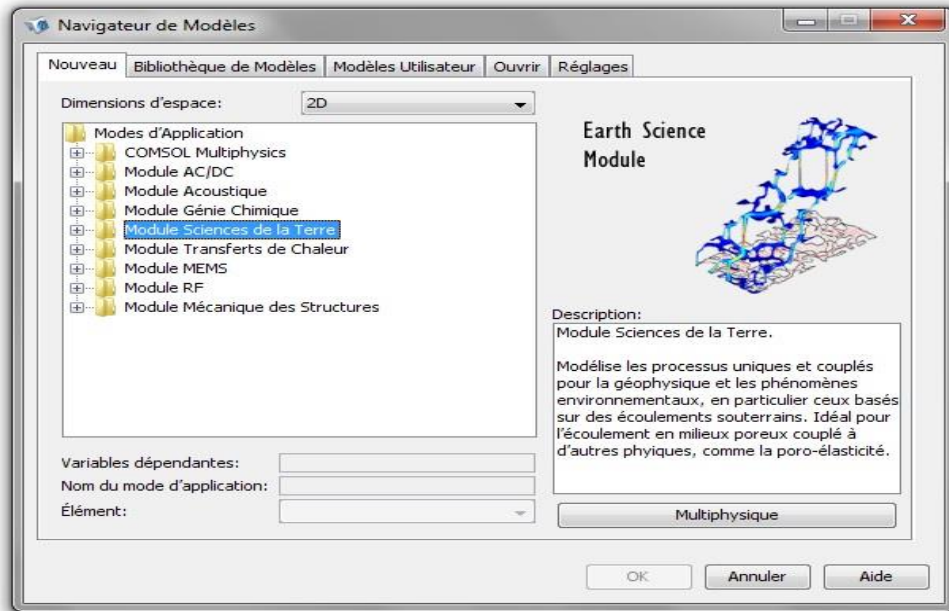
### **III.1.3- Présentation générale du logiciel :**

Au démarrage du logiciel, le navigateur de modèle apparaît. C'est lui qui permettra de définir le ou les modèles physiques qui seront utilisés. C'est aussi ici que la dimension de l'espace est choisie (2D, 2D axisymétrique, 3D, ...). Pour chacun des modèles, il est précisé quelles sont les variables, et quel est le suffixe propre à ce modèle. (Figure III.1)

#### **III.1.3.1- Le module de sciences de la Terre :**

Le module de sciences de la Terre étant un module optionnel qui étend l'environnement COMSOL Multiphysics modélisation à l'enquête quantitative des phénomènes géophysiques et environnementales. Il est conçu pour les chercheurs, les ingénieurs, les concepteurs, les

enseignants et les étudiants, et il convient à la fois unique-physique et l'étude interdisciplinaire. La terre et les planètes forment un laboratoire géant rempli avec une gamme illimitée de la physique de base et les interactions entre multiphysique.



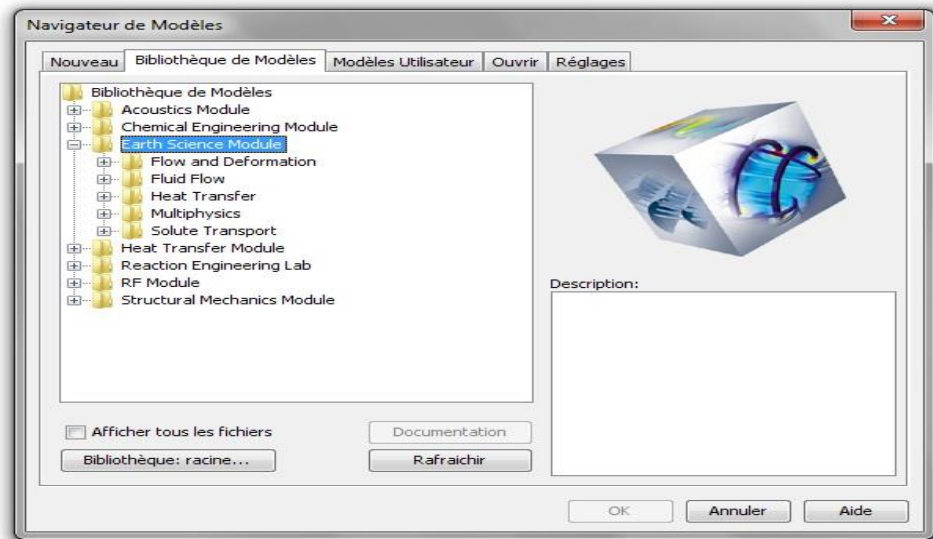
**Figure III.1-Nouveau Modèle**

Le contenu du module de sciences de la Terre sont un ensemble de blocs de construction fondamentaux avec lesquels poser et répondre à un large éventail de questions de physique. L'équation interfaces qu'il propose est une fonction de leur propriété et un lien arbitraire. Ils ont également couple à la physique déjà intégrés dans COMSOL Multiphysics, de toute nouvelles équations que vous créez, et les modes d'application dans les autres modules spécialisés. Parce que COMSOL Multiphysics élimine les complications de l'écriture de votre propre code, il est

notre espoir que vous allez utiliser le Module des sciences de la Terre comme un tremplin pour apprendre et d'explorer une riche variété de modélisation physique.

Les options pour les milieux poreux saturés comprennent la loi de Darcy pour débit lent et les équations Brinkman où le cisaillement est non négligeable. Les équations de Navier Stokes couvrent la circulation libre. Le module traite également le transport des produits chimiques et leurs réactions. Le compte des modes d'application de transport de masse pour le transfert de produits chimiques et dans les phases gazeuses solides, liquides, et écoulements de fluide variable saturés.

Un certain nombre d'exemples dans le lien de la bibliothèque de modèle de ces modes d'application ensemble. Certains apportent également dans d'autres physiques de COMSOL Multiphysics (figure.2)



**Figure III.2 Bibliothèque de Modèles**

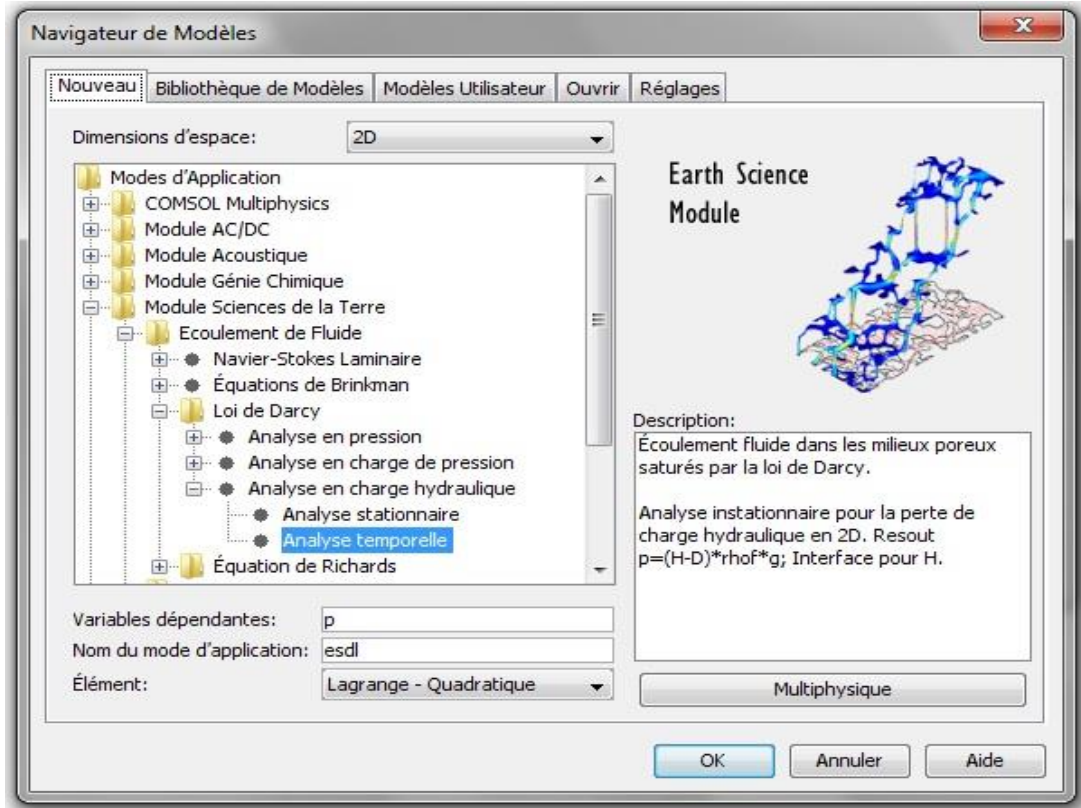
Le module de sciences de la Terre contient un certain nombre de modes d'application que les équations prédéfinir ou des ensembles d'équations adaptées aux applications géoscientifiques. Vous pouvez prendre les équations de ces modes d'application et les variables qu'ils offrent et ensuite les modifier, les relier entre eux, et les coupler à la physique représentés ailleurs dans COMSOL Multiphysics. Ce module traité les problèmes dépendant du temps (temporaire) et stationnaire pour 1D, 2D et 3D Systèmes avec symétrie de révolution pour 1D et 2D.

L'écoulement du fluide ce groupe de modes d'application estime la pression et la vitesse de fluides s'écoulant dans les systèmes libres et à l'intérieur des interstices d'un milieu poreux. Ils comprennent les équations de Navier-Stokes pour surface libre et d'autres flux libres; les équations Brinkman pour l'écoulement rapide de l'écoulement en milieu poreux; la loi de Darcy pour un écoulement en milieu poreux qui est relativement lente, et l'équation de Richards pour les systèmes variablement saturés. Avec la loi de Darcy et l'équation de Richards, COMSOL Multiphysics résout pour la pression et offre des interfaces pour le maximum de pression et la charge hydraulique. Vous pouvez configurer ces équations des fluides simples ou multiples. Vous pouvez également coupler à d'autres physique pour décrire poroélasticité, la convection de la chaleur et des flux de densité entraînés, transfert soluté et les forces électromagnétiques, pour poroélasticité, le Poroélasticité couplage multiphysique prédéfini (nécessite le module de mécanique des structures ou le module MEMS) définit le mode d'application de la loi de Darcy avec un mode d'application de la mécanique structurelle et fournit des paramètres appropriés pour décrire l'interaction entre le solide et le liquide.

### **III.1.4 Mode opératoire de COMSOL Multiphysics :**

Ouvrir l'icône de COMSOL Multiphysics sur le bureau par double clic, si le model est ouvert on va choisir la dimension d'espace le default de l'interface est sur 2D, après on choisit : **Nouveau**>

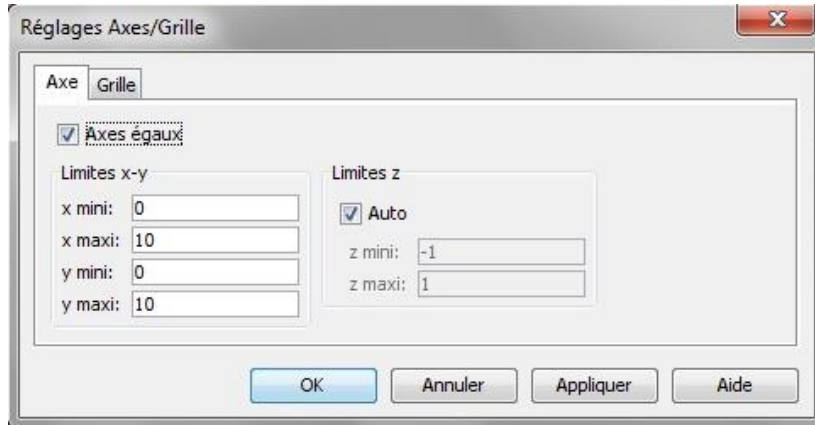
module de sciences de la Terre >écoulement de fluide>loi du darcy>analyse en charge hydraulique> (soit analyse stationnaire soit analyse temporelle) (figure.3).



FigureIII.3 Nouveau modèle écoulement de fluide

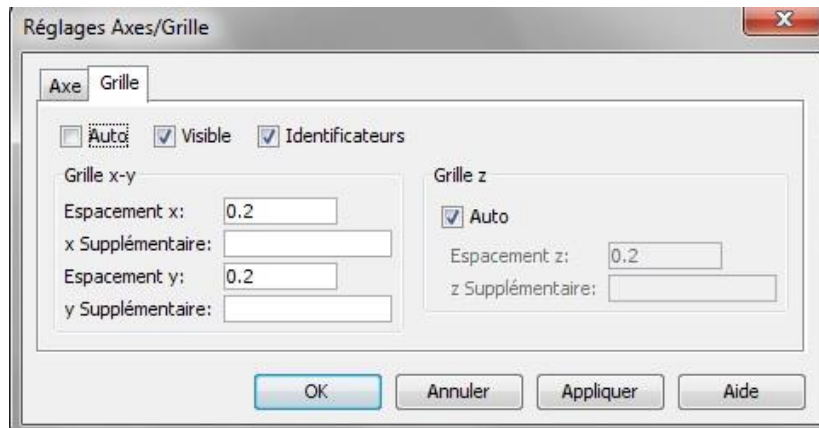
### III.1.4.1 Réglages des axes et des grilles :

On passe a **OPTION> Réglages Axes/Grille** pour choisi coordonnes x, y minimum et maximum du domaine (figure.4)



**Figure III.4-Réglages des axes**

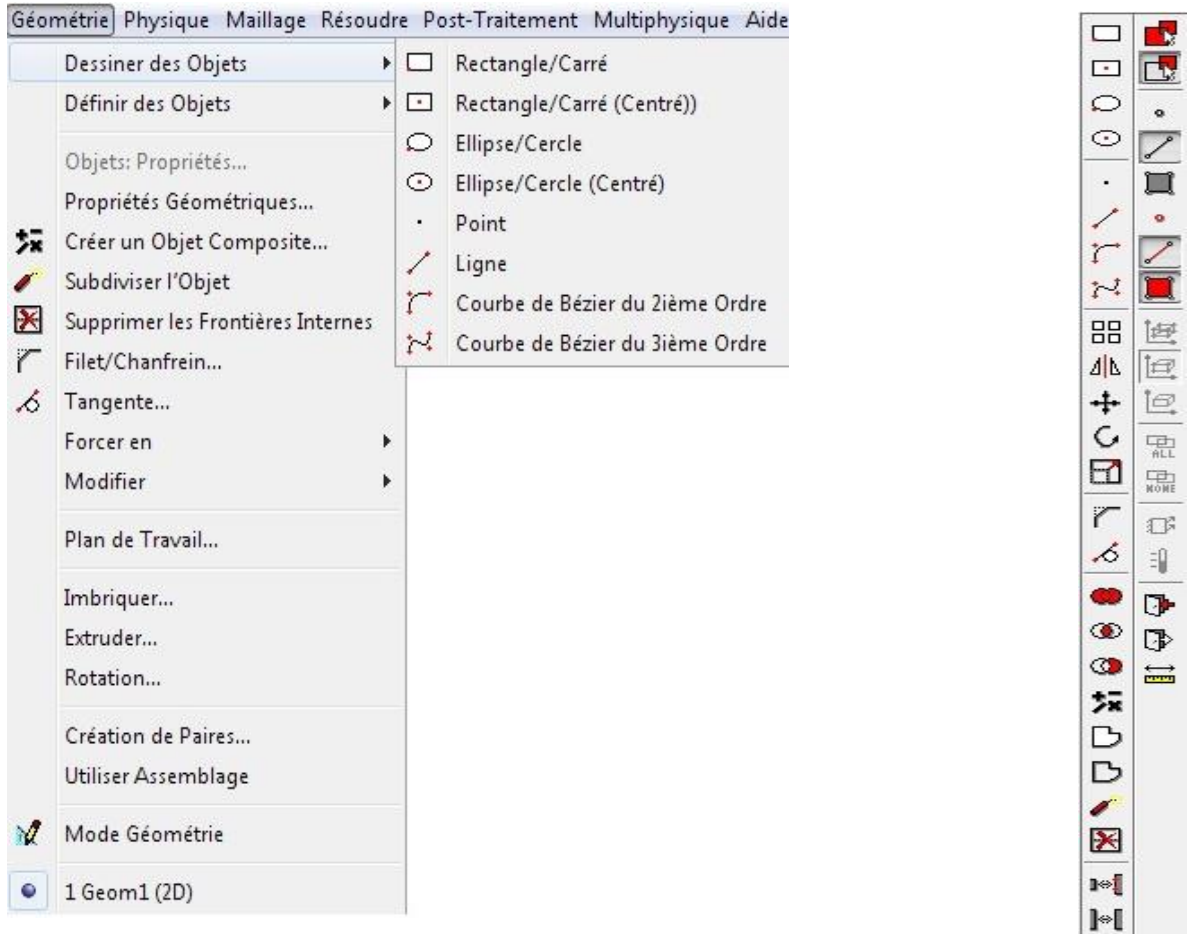
Réglage de l'espacement  $\Delta x, \Delta y$  a deuxième fenêtre de **Grille** (figure.5)



**Figure III.5 -Réglages des grilles**

### III.1.4.1- Outillage de dessin :

Les outils de dessin soit en **Géométrie> Dessiner des objets** (figure.6), soit sur barre d'outil a fenêtre.



**Figure III.6-Outillage de dessin, Barre d'outils.**

### III.1.4.2- Maillage :

Dans l'analyse des éléments finis, le domaine de résolution est discrétisé en sous domaines appelés éléments. Ces éléments sont les briques élémentaires dont le maillage va représenter le système géométrique à simuler. Les éléments sont des primitives géométriques composant plusieurs nœuds, la figure représente des exemples d'éléments classiques qu'on rencontre généralement dans le maillage éléments finis.

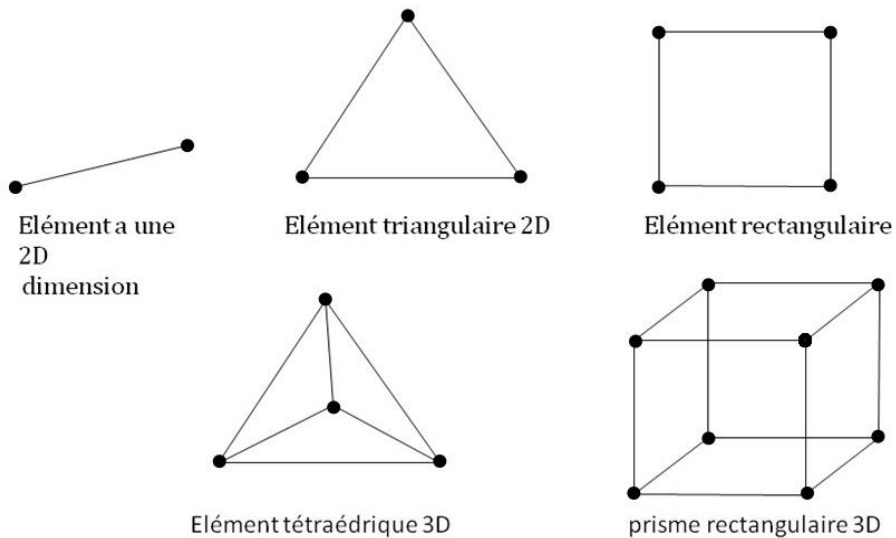
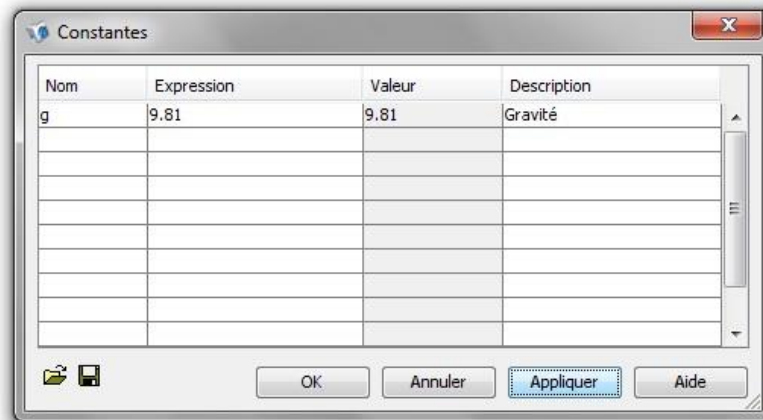


Figure III.7- différents types de maillage.

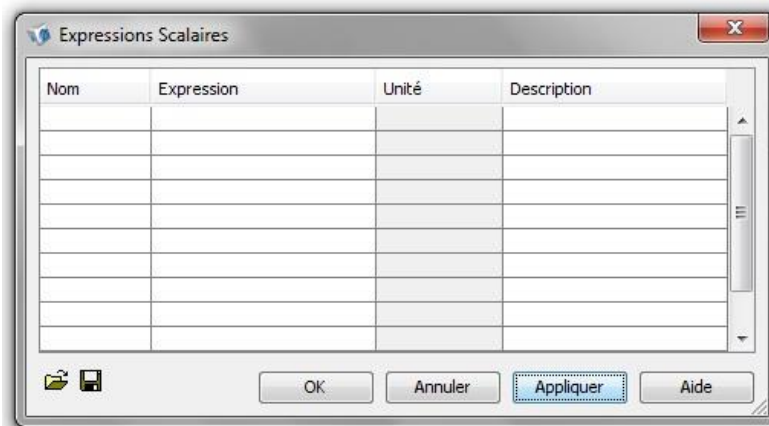
### III.1.4.3- Les constantes et les variables :

Pour définir les constantes de la géométrie comme la gravité et les coefficients, entrez les constantes dans **options>constantes** (figureIII.8).



**Figure III.8-les constantes**

Les variables qui valide en tout le domaine géométrie définies par expression scalaire, **options>expressions>expressions scalaires** (figureIII.9).



**Figure III.9-expressions scalaires**

Après traçage les limites du domaine on peu définies les paramètres de ce domaine comme le coefficient de perméabilité  $K_s$ , débit  $Q_s$  et  $\rho_f$  (Figure III.10) et l'hauteur initial  $H_0$  (figure III.11).

Pour saisis ces paramètres par **Physique>sous-domaines>**.

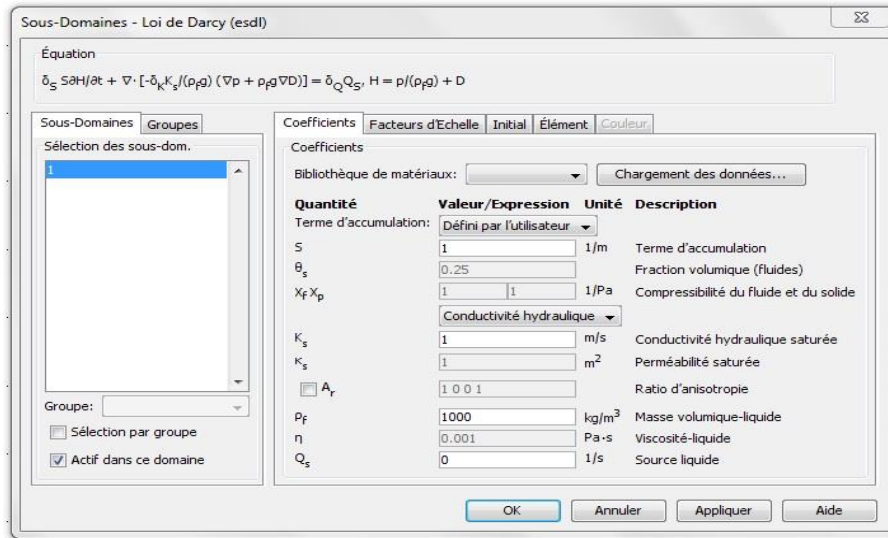


Figure III.10-Sous-domaines Coefficient

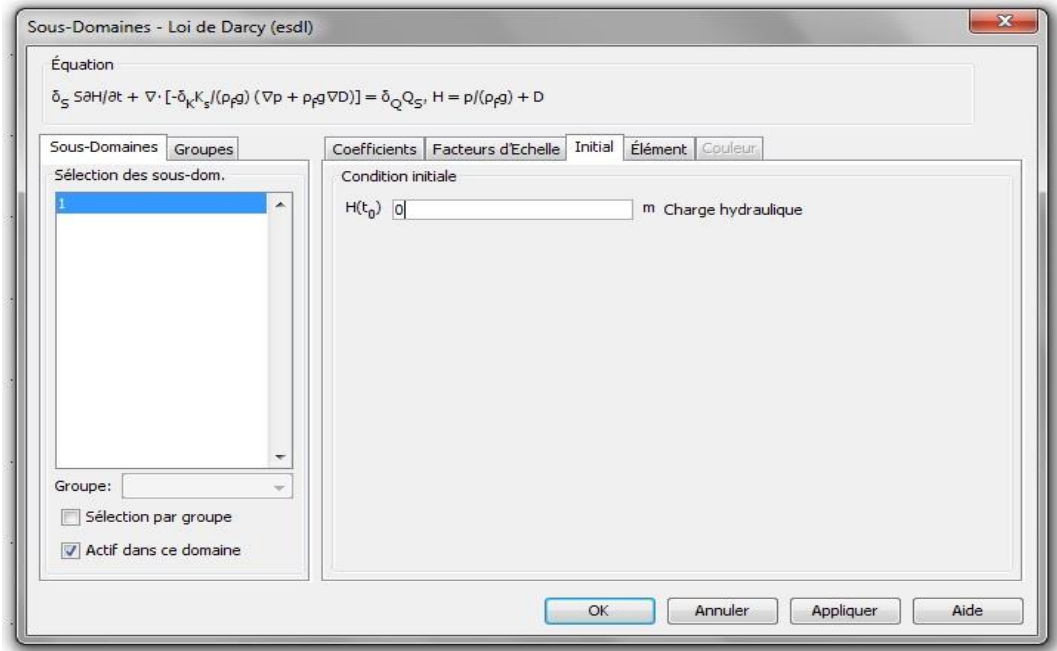
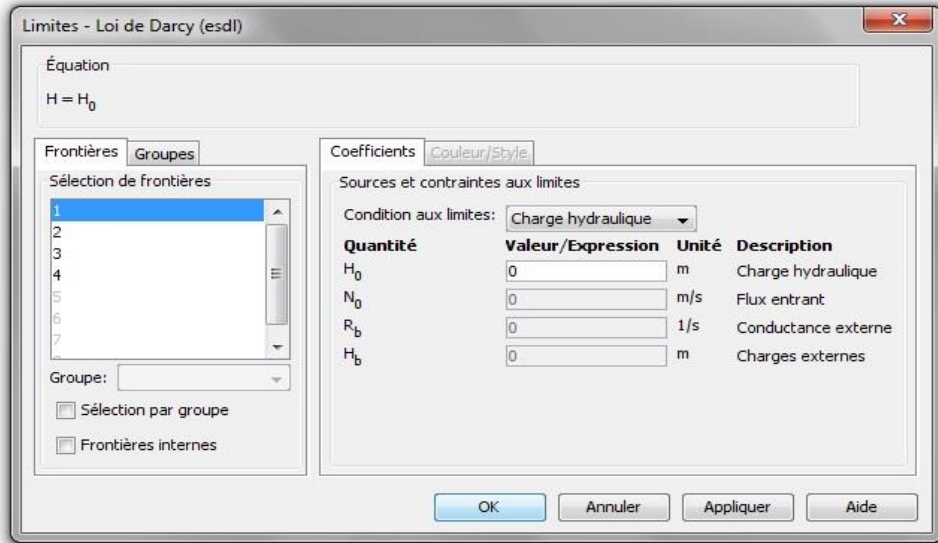


Figure III.11-Sous-domaines Initial

#### III.1.4.4 Conditions de frontières :

Pour chacune des conditions frontières sélectionnez la frontière appropriée dans la fenêtre d'affichage graphique et ajoutez-la à la condition frontière. Entrez aussi les paramètres associés à la condition aux limites de chaque frontière (figure III.12). Cette fenêtre a **Physique>limites**.



**Figure III.12- limites**

### **III.2 Simulation et traitement des résultats :**

Pour effectuer la simulation, cliquez sur **résoudre**, avant résoudre le problème en passe a les paramètres desolveurs pour modifie le type d'analyse temporelle ou bien stationnaire, si on choisi temporelle modifie aussi le pas de temps (figure III.13).

Pour résoudre le problème, le logiciel COMSOL se chargera de choisir les paramètres du solveur en fonction des modèles physiques choisis. Le résultat que vous devriez obtenir est présenté.

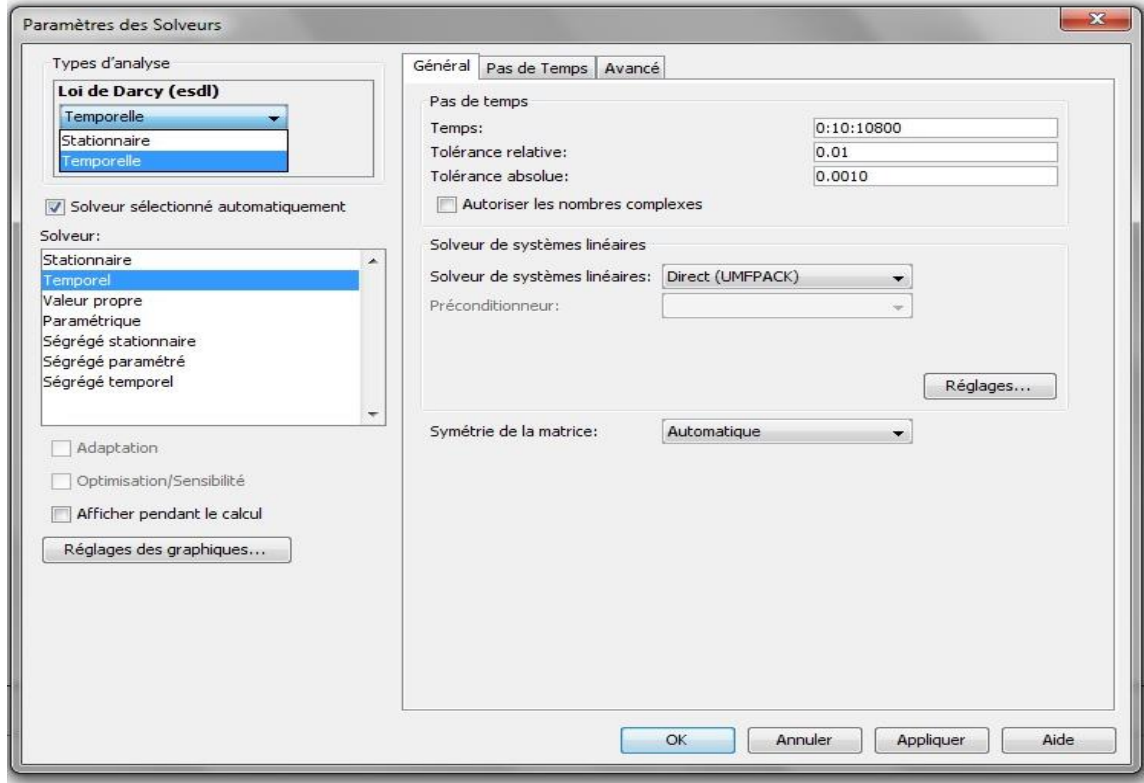


Figure III.13-paramètres des solveurs

### III.3 Modélisation de transport du polluant :

Le modèle utilise l'interface de l'équation de Richards pour définir les relations non linéaires avec propriétés de rétention et de perméabilité selon van Genuchten. Dans l'interface de l'équation Richards, vous pouvez également définir ces propriétés des matériaux avec une perméabilité d'analyse et de formules de rétention de Brooks et Corey. Ou par interpolation à partir des données expérimentales.

L'équation de Richards représente l'évolution de la fraction volumique de fluide avec le temps, et aussi des changements dans la mémoire liée à des variations dans la tête de pression selon

J.Ours. Avec les conditions de stockage, les équations soluté de transport dans le flux de subsurface, le modèle compte explicitement les changements de temps dans le contenu liquide et de l'air.

### III.3.1- L'Écoulement d'un fluide :

L'équation de Richards régit le flux saturé-insaturé de l'eau dans le sol. Le sol-air est ouvert à l'atmosphère, de sorte que vous pouvez supposer que les changements de pression dans l'air n'affectent pas le flux et utiliser l'équation de Richards ici pour l'écoulement monophasique. L'équation de Richards dans la tête de pression est :

$$(C + SeS) \frac{\partial H_p}{\partial t} + \nabla \cdot (-K \nabla (H_p + D)) = 0$$

Où C désigne la capacité de l'humidité spécifique ( $m^3/m^3$ ); S'est la saturation efficace de la terre (sans dimension); S est un coefficient de stockage ( $m^3/m^3$ );  $H_p$  est la tête de pression (m), qui est proportionnel à la variable dépendante, p (Pa); t est le temps; K est égal à la conductivité hydraulique (m / s); D est la direction (typiquement, la direction z) qui représente en élévation verticale (m).

À être capable de combiner des conditions aux limites et des sources avec la formulation de la loi de Darcy, COMSOL Multiphysics convertit l'équation de Richards en unités SI et résout pour la pression (unité SI: Pa). Tête hydraulique, H, la tête de pression,  $H_p$ , et l'élévation D sont liées à la pression p en tant que

$$H_p = \frac{p}{\rho g}; \quad H = H_p + D$$

En outre, la perméabilité K (unité SI: 1 / m2) et de la conductivité hydraulique K (unité SI: m / s) sont liés à la viscosité  $\mu$  (unité SI: Pas) et la densité  $\rho$  (unité SI: kg / m3) de le fluide, et l'accélération de la pesanteur g (unité SI: m / s2) par

$$\frac{\kappa}{\mu} = \frac{K}{\rho g}$$

Dans ce problème,  $S = (\theta_s - \theta_r) / (1 - \theta_r)$  où  $\theta_s$  et  $\theta_r$  représentent la fraction volumique du

fluide à saturation et après le drainage, respectivement. Pour plus de détails, voir Richards' Interface équation dans le Guide du module de flux de subsurface utilisateur.

Avec un débit variable saturé, le fluide se déplace à travers, mais peut ou peut ne pas remplir complètement les pores dans le terrain, et  $\theta$  représente la fraction de volume de fluide dans le sol. Les coefficients  $C$ ,  $S_e$ , et  $K$  varie avec la tête de pression,  $H_p$ , et avec  $\theta$ , ce qui rend l'équation non linéaire de Richards. La capacité de l'humidité spécifique,  $C$ , des variations se rapporte à l'humidité du sol à la tête pression en  $C = \partial\theta/\partial H_p$ . Dans l'équation qui régit,  $C$  définit les modifications de stockage produites en faisant varier la teneur en fluide, car la  $C\partial H_p/\partial t = \partial\theta/\partial t$ . Parce que  $C$ , le premier terme du coefficient de temps, passe à zéro à saturation, le changement dans le temps de stockage se rapporte à la compression de la nappe et l'eau dans des conditions saturées. Le stockage saturée se produit avec la saturation efficace, comme représenté par la deuxième terme dans le temps coefficient. En outre,  $K$  est une fonction qui définit comment facilement le milieu poreux transmet du fluide. La perméabilité relative du sol,  $k_r$ , augmente avec la teneur en fluide donnant  $K = K_s k_r$ , où  $K_s$  (m/d) est la conductivité hydraulique constante à saturation.

Cet exemple utilise des interfaces prédéfinies des formules de van Genuchten( [Réf. 2](#)) Pour représenter la façon dont les quatre rétention et les propriétés de perméabilité — $\theta$ ,  $C$ ,  $S_e$ , et  $k_r = K/K_s$  -varient avec la solution  $H_p$ . Les expressions de van Genuchten se lisent comme suit:

$$\theta = \begin{cases} \theta_r + S_e(\theta_s - \theta_r) & H_p < 0 \\ \theta_s & H_p \geq 0 \end{cases}$$

$$S_e = \begin{cases} \frac{1}{[1 + |\alpha H_p|^n]^m} & H_p < 0 \\ 1 & H_p \geq 0 \end{cases}$$

$$C = \begin{cases} \frac{\alpha m}{1-m}(\theta_s - \theta_r)S_e^{\frac{1}{m}}\left(1 - S_e^{\frac{1}{m}}\right)^m & H_p < 0 \\ 0 & H_p \geq 0 \end{cases}$$

Ici  $\alpha$ ,  $n$ ,  $m$ , et  $l$  sont des constantes qui spécifient le type de support, avec  $m = 1 - 1/n$ . Dans les équations, le système arrive à saturation lorsque la pression de fluide est l'air (qui est,  $H_p= 0$ ).

Lorsque le sol se sature complètement, les quatre paramètres atteignent des valeurs constantes.

### III.3.1.1- Conditions aux limites et conditions initiales

L'énoncé du problème enregistre toutes les conditions aux limites dont vous avez besoin pour ce modèle. Le niveau d'eau dans la bague est connu à 0,01 m, ce qui donne une contrainte de Dirichlet sur la tête de pression. Approximer la petite fuite de la base,  $N_0$ , comme 0.01Ks. En l'absence de débit traversant la surface extérieure de l'anneau de pression ou les parois verticales, les expressions ci-après résument les conditions aux limites:

$$\begin{array}{ll}
 H_p = H_{p0} & \partial\Omega \text{ Ring} \\
 \mathbf{n} \cdot \mathbf{u} = 0 & \partial\Omega \text{ Surface} \\
 \mathbf{n} \cdot \mathbf{u} = 0 & \partial\Omega \text{ Sides} \\
 \mathbf{n} \cdot \mathbf{u} = 0 & \partial\Omega \text{ Symmetry} \\
 \mathbf{n} \cdot \rho \mathbf{u} = N_0 & \partial\Omega \text{ Base}
 \end{array}$$

Dans ces expressions,  $\mathbf{n}$  est le vecteur unité normal à la surface de délimitation, et  $\mathbf{u}$  est le champ de vitesse de Darcy. Les conditions initiales spécifient la tête de pression dans le domaine de la modélisation comme suit:

$$H_p = \begin{cases} -(z + 1.2 \text{ m}) - 0.2(z + 0.4 \text{ m}) & \text{Upper layer} \\ -(z + 1.2 \text{ m}) & \text{Lower layer} \end{cases}$$

### III.3.2- Transport de soluté (Nitrates) :

L'écoulement de l'eau souterraine et le transport de soluté sont reliés par des vitesses de fluide. Avec la forme de l'équation de transport qui suit, doivent les vitesses de fluide proviennent de la loi de Darcy:

$$\mathbf{u} = K_s k_r \nabla(H_p + D) \quad (1)$$

Dans cette expression,  $\mathbf{u}$  est le champ de vitesse de Darcy (unité SI: m / s).

L'équation qui régit advection, dispersion, sorption, et la décomposition des solutés dans l'eau souterraine est :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta c) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho_b c_P) + \nabla \cdot [-\theta D_L \nabla c + \mathbf{u}c] = \Sigma R_L + \Sigma R_P + S_c$$

Il décrit le taux de variation temporelle en deux termes:  $c$  désigne la concentration en solution (kg / m), et  $C_p$  est la masse du contaminant adsorbé par unité de poids sec de substance solide (mg / kg). En outre,  $\theta$  désigne la fraction de volume de fluide (sans dimension), et  $\rho_b$  est la masse volumique apparente (Kg / m<sup>3</sup>). Parce que  $\rho_b$  revient à la masse solide séché par volume apparent des solides et des pores ensemble, le terme  $\rho_b c_p$  donne une masse de soluté attaché au sol en tant que concentration. Dans l'équation,  $D_L$  est le tenseur de dispersion hydrodynamique (m<sup>2</sup> / j);  $R_L$  représente les réactions dans de l'eau (kg / (m<sup>3</sup> · j)); et  $R_P$  est égale à des réactions faisant intervenir des solutés attachés aux particules de sol (kg / (m<sup>3</sup> · j)). Enfin,  $S_c$  est le soluté ajouté par volume de sol par unité de temps unitaire (kg / (m<sup>3</sup> · j)).

Il est beaucoup plus pratique pour résoudre l'équation ci-dessus que la concentration dissoute. Cela nécessite l'élargissement du côté gauche

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta c) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho_b c_P) = \theta \frac{\partial c}{\partial t} + c \frac{\partial \theta}{\partial t} + \rho_b \frac{\partial c_P}{\partial c} \frac{\partial c}{\partial t}$$

et insérer quelques définitions.

Dans ce problème, la masse de soluté par unité de masse solide,  $c_P$ , se rapporte à la concentration en solution,  $c$ , par une isotherme linéaire ou coefficient de partage  $k_P$  (m<sup>3</sup>/ kg) lorsque  $c_P = K_C P$ . Car la relation est linéaire, le dérivé est  $k_P = \partial c_P / \partial c$ . Faire ces substitutions donnera la forme du problème de transport de soluté vous résoudre:

$$(\theta + \rho_b k_p) \frac{\partial c}{\partial t} + c \frac{\partial \theta}{\partial t} + \nabla \cdot (-\theta D_L \nabla c + \mathbf{u}c) = \theta \phi_L c + \rho_b k_p \phi_P c + S_c$$

Dans l'équation,  $\phi_L$  et  $\phi_P$  désignent les taux de décomposition ( $d^{-1}$ ) pour les concentrations dissoutes et soluté sorbé, respectivement.

Sélectionnez le **Changement d'heure dans la tête de pression** option **changement de temps de fraction fluide** dans le **Milieu poreux** paramètres du liquide mobile, Immobile fonctionnalité solide et du gaz à employer résulte de l'équation d'écoulement dans le modèle de transport de soluté:

$$c \frac{\partial \theta}{\partial t} = c C \frac{\partial H_p}{\partial t}$$

Notez que COMSOL Multiphysics résout pour la pression,  $p$ , et se transforme en  $H_p$  sur la base du poids du fluide. Le tenseur de dispersion hydrodynamique,  $D_L$ , décrit mécanique d'étalement de la circulation des eaux souterraines, en plus de la diffusion chimique:

$$\begin{aligned} \theta D_{Lii} &= \alpha_1 \frac{u_i^2}{|\mathbf{u}|} + \alpha_2 \frac{u_j^2}{|\mathbf{u}|} + \theta D_m \tau_L \\ \theta D_{Lij} &= \theta D_{Lij} = (\alpha_1 - \alpha_2) \frac{u_i u_j}{|\mathbf{u}|} \end{aligned}$$

Où  $D_{Lii}$  sont les entrées diagonales du tenseur de dispersion;  $D_{Lij}$  sont les termes croisés;  $\alpha$  est la dispersivité (m); les indices « 1 » et « 2 » désignent les écoulements longitudinale et transversale, respectivement;  $D_m$  désigne le coefficient de diffusion moléculaire ( $m^2 / j$ ); et  $\tau_L$  est un facteur de tortuosité qui réduit les effets de la diffusion moléculaire pour les milieux poreux par rapport à l'eau libre.

$$\text{ici } \tau_L = \theta^{7/3} \theta_s^{-2}.$$

### III.3.2.1 -Conditions aux limites et conditions initiales :

Les conditions aux limites et initiales du problème sorbante-soluté sont simples. Le soluté entre seulement avec l'eau de l'anneau à une concentration  $c_0$ . Le soluté est libre de partir, mais il n'y a qu'une fuite minime de la partie inférieure limite et aucun écoulement sur les côtés. Le transport est symétrique par rapport à la ligne  $r = 0$ . les conditions aux limites de ce problème sont les suivants:

$$\begin{array}{ll}
 c = c_0 & \partial\Omega \text{ Ring} \\
 \mathbf{n} \cdot (-\theta D_L \nabla c) = 0 & \partial\Omega \text{ Surface} \\
 \mathbf{n} \cdot (-\theta D_L \nabla c) = 0 & \partial\Omega \text{ Sides} \\
 \mathbf{n} \cdot (-\theta D_L \nabla c + \mathbf{u}c) = 0 & \partial\Omega \text{ Symmetry} \\
 \mathbf{n} \cdot (-\theta D_L \nabla c) = 0 & \partial\Omega \text{ Base}
 \end{array}$$

Où  $\mathbf{n}$  est le vecteur unitaire perpendiculaire à la limite. Parce que le sol est vierge au début de l'expérience, la condition initiale est l'une de concentration nulle.

#### MODE DATA

**Tableau.III.1.** Le tableau suivant fournit des données pour le modèle d'écoulement de fluide:

VARIABLE	UNI	LA DESCRIPTION	COUCHE	coucheinférieur
$K_s$	Mary	Conductivité hydraulique	0,298	0,454
$\theta_s$		Porosité / fraction de vide	0,399	0,339
$\theta_r$		saturation résiduelle	0,001	0,001
$\alpha$	m <sup>-1</sup>	paramètre alpha	1,74	1,39
$n$		paramètre n	1,38	1.60
$m$		paramètre m	1-1 / n	1-1 / n
$l$		Pore paramètre de	n / a	
$H_{p0}$	m	Tête de pression en anneau	0,01	
$H_{p, \text{init}}$	m	tête de pression initiale	- (z + 1,2) -0,2 (z + 0,4)	- (z + 1,2)

**Tableau.III.2.** Les entrées nécessaires pour le modèle de transport de soluté sont:

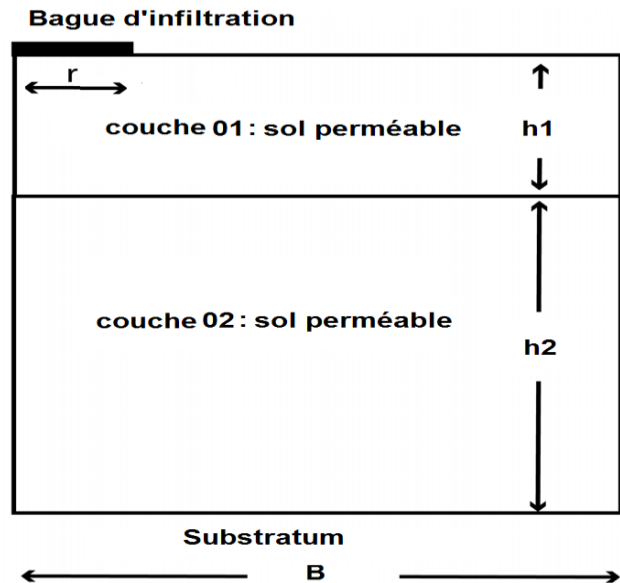
VARIABLE	UNITES	LA DESCRIPTION	VALEUR
$\rho_b$	kg / m <sup>3</sup>	Masse volumique apparente	1400
$k_d$	m <sup>3</sup> /kg	Coefficient de partage	0,0001
$r_{ém}$	m <sup>2</sup> /j	Coefficient de diffusion moléculaire	0,00374
$\alpha_r$	m	Dispersivité longitudinale	0,005
$\alpha_z$	m	dispersivité transverse	0,001
$\phi_L$	d <sup>-1</sup>	Decay taux en liquide	0,05
$\phi_P$	d <sup>-1</sup>	taux Decay solide	0,01
$c_0$	kg / m <sup>3</sup>	la concentration du soluté dans le cycle	1.0
$c_{initiale}$	kg / m <sup>3</sup>	concentration initiale de soluté dans le sol	0

### III.3.3 -Méthodologie :

Dans ce modèle, l'eau est accumulée dans un anneau sur le sol se déplace dans une colonne de sol relativement sec et transporte un polluant avec lui. Comme il se déplace à travers la colonne de sol variablement saturé, le polluant se fixe aux particules de sol, ce qui ralentit le transport du soluté par rapport à l'eau. En outre, la concentration du polluant à partir de la décomposition et la biodégradation à la fois entre le liquide et la phase solide.

L'eau se déplace à partir d'un anneau du terrain dans le sous-sol. L'anneau de rayon de  $r$  conduit l'eau et le polluant par infiltration de la surface à une profondeur  $H$ .

Le sol se compose de deux couches perméables d'épaisseurs  $h_1$  et  $h_2$  profondeur. Le sol de la couche 02 est légèrement moins perméable que le sol de la couche 01. La couche inférieure (02) se trouve au-dessus du sol relativement imperméable (Substratum).



*Figure14: La géométrie de la bague d'infiltration et de la colonne de sol.*

L'écoulement est symétrique autour de la ligne  $r = 0$ . Aucun écoulement transversal qui traverse la surface extérieure de l'anneau, et aucun écoulement de bas en haut. La distribution initiale des têtes de pression est connue.

L'eau dans le cycle contient un soluté dissous (Nitrates) à une concentration constante  $C_0$ . Le soluté pénètre dans le sol avec l'eau et se déplace à travers le sous-sol par l'advection et la dispersion. En outre, les sorbes de soluté ou se fixe à des surfaces solides, ce qui réduit les concentrations aqueuses et ralentit également le mouvement soluté par rapport à l'eau. La dégradation microbienne réduit également à la fois la phase liquide et la concentration en phase solide. La sorption et la biodégradation sont linéairement proportionnelles aux concentrations aqueuses. Le fluide dans le noyau est la seule source chimique, et le soluté est libre de quitter la colonne de sol avec le flux de fluide. Au départ, le sol est libre du soluté. Vous suivre son transport pendant dix jours.

### **III.3.4- Etapes du Modèle Chemin: Subsurface\_Flow\_Module /**

#### **Solute\_Transport / sorbing\_solute :**

Les étapes du modèle chemin sont enregistrées en annexe.

### **III.5-Application du modèle par les données du site d'étude :**

#### **III.5.1- Présentation du site d'étude :**

Une pollution par les nitrates a été détectée dans les eaux souterraines de la région de Boussalem par des analyses hydrochimiques au cours des dernières années. La teneur en cet élément a dépassé le seuil de 50 mg/l préconisé par les normes algériennes et celles de l'O.M.S. Ceci est dû probablement à l'utilisation abusive des éléments azotés (engrais chimiques : phosphates, Nitrates,...) et les fumiers (déjection animale) dans l'activité agricole dont le but de fertilisation des terrains.

De telles actions suggèrent une lixiviation portant des quantités substantielles de produits riches en azote qui contribuent à la pollution de la nappe par infiltration.

Pour simuler le transport de nitrates dans l'eau souterraine de la plaine de Boussalem et suivre l'évolution de cette pollution dans le temps et dans l'espace, on a utilisé le modèle de transport du polluant défini en dessus, basé sur l'équation de Richards.

### **III.5.2- Traitement des données du site d'étude :**

\*Une grande difficulté trouvée dans la recherche et le regroupement des données du site d'étude vu l'absence des études concernant la géologie, l'hydrogéologie, la pédologie,... ce qui nous a obligé de chercher les données d'approche des sites similaires à notre site d'étude.

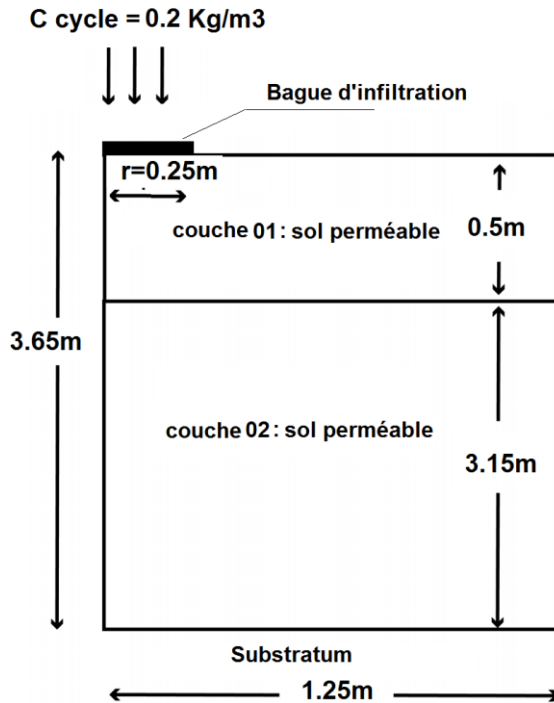
\* La coupe géologique du forage utilisée pour le modèle (Voir annexe n°02), dont la profondeur est de : 73 m.

\*la concentration du polluant nitrate dans les eaux de ce forage est :

$$66 \text{ mg/l} = 0.066\text{kg/m}^3.$$

\* l'échelle réduite utilisée pour la géométrie du modèle est de : 1m = 20m réels.

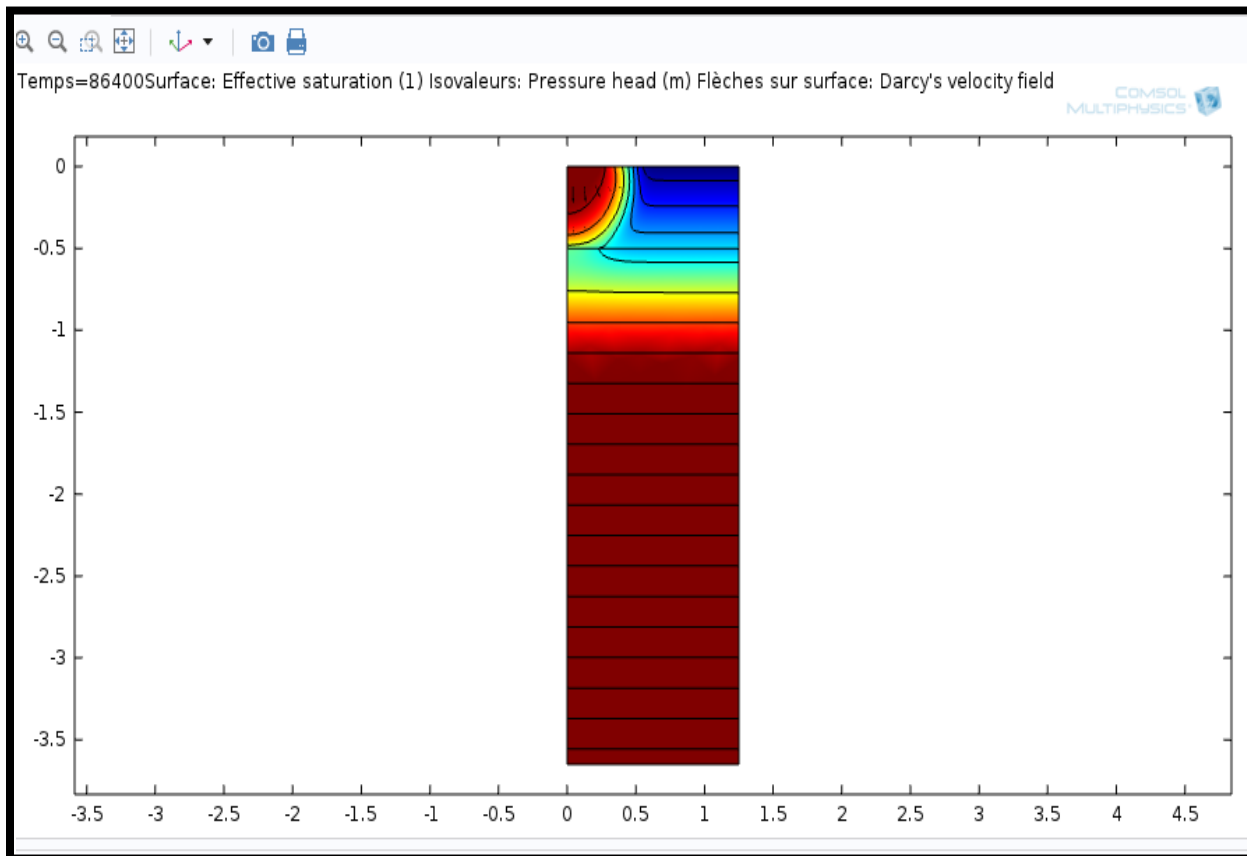
### III.5.2.1- Géométrie du modèle du site d'étude :



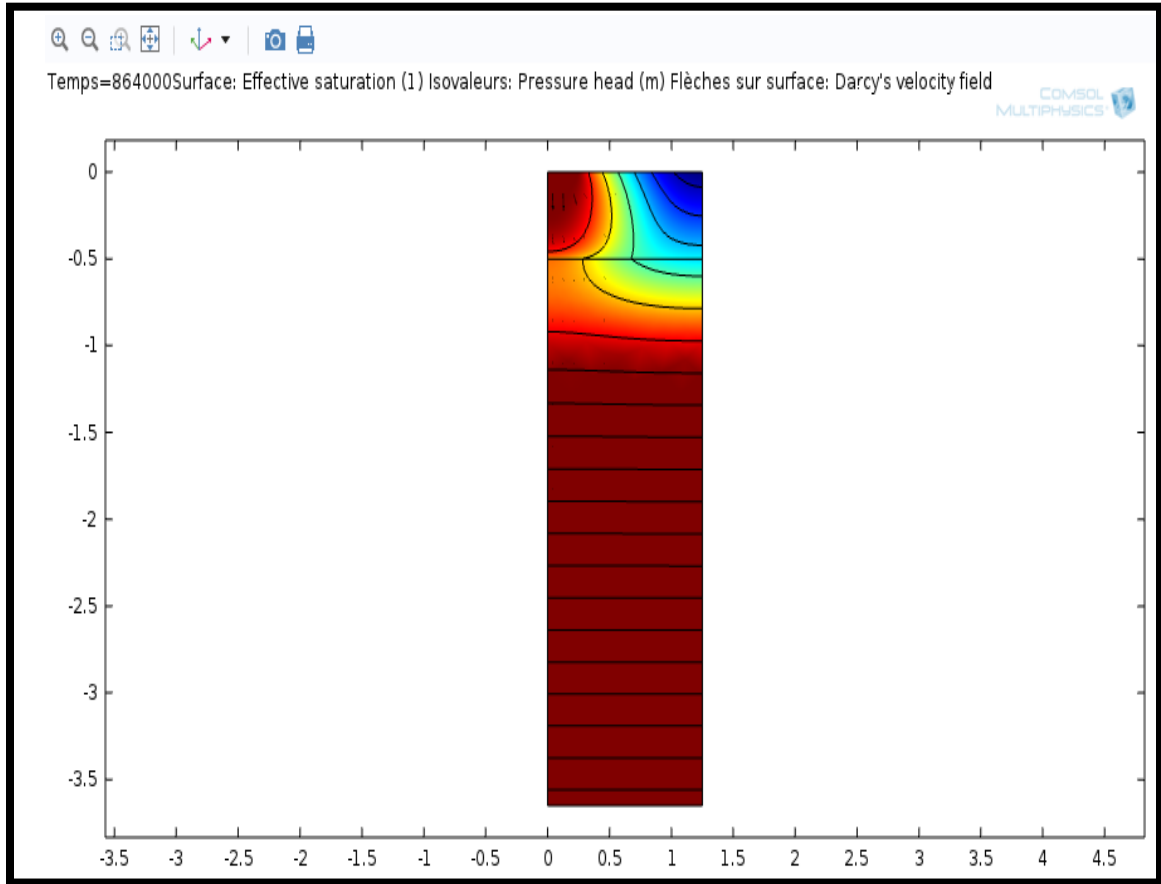
*Fig III.15 : La géométrie de la bague d'infiltration et de la colonne de sol du site d'étude*

### III.5.2- Résultats et discussion :

Les figures 16 et 17 montrent la propagation de du fluide (eau polluée en nitrates) à 1 jours et 10 jours, respectivement. Comme elles montrent la saturation efficace (tracé de la surface), la tête de pression (contours), et les vitesses (flèches). Ainsi elles illustrent le sol de mouillage avec le temps. Les flèches indiquent les vitesses juste en dessous de l'anneau sont élevés par rapport au reste de la colonne de sol.

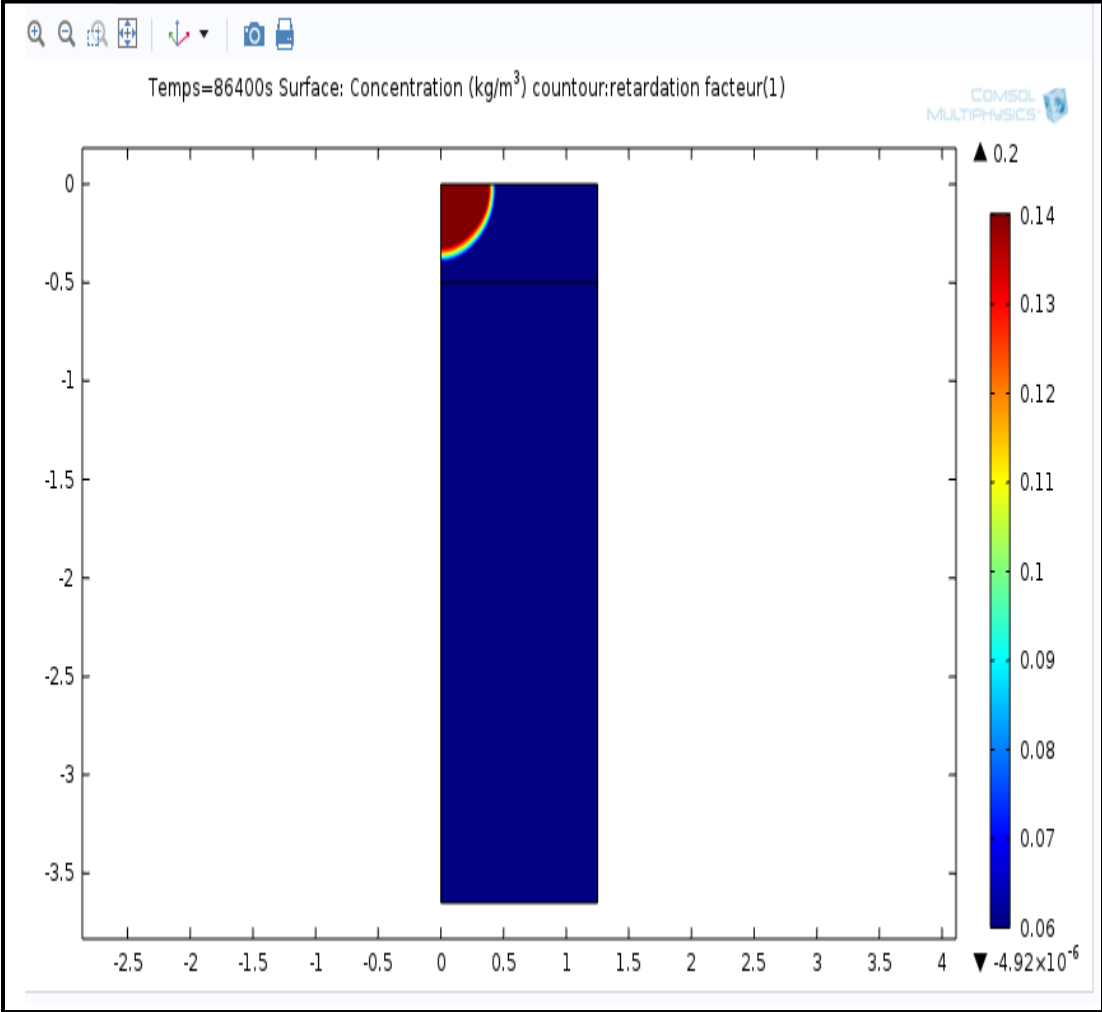


**Fig. III.16 : Estimations de saturation effective (tracé de surface) la tête de pression (contour) et la vitesse (flèches) dans le sol de manière variable saturée après 1 jour.**

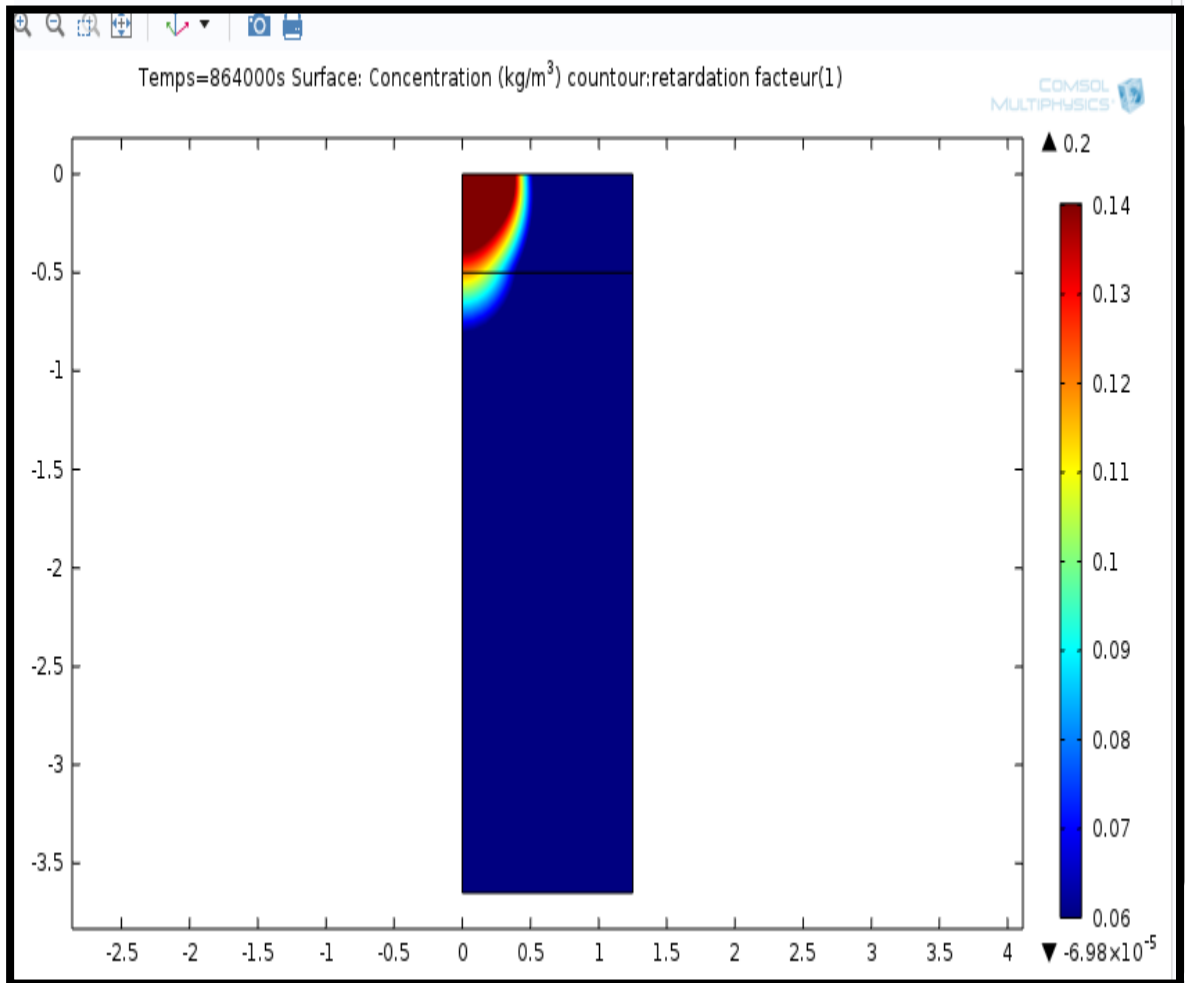


**Fig. III.17 : Estimations de saturation effective (tracé de surface) la tête de pression (contour) et la vitesse (flèches) dans le sol de manière variable saturée après 10 jours.**

Les figures 18 et 19 donnent la diffusion des concentrations pendant 1 jour et 10 jours, respectivement, ainsi que le facteur de retardement. Ils illustrent la manière dont les concentrations de soluté (de tracé de la surface) entrent et se déplacent à travers le sol. Étant donné que le facteur de retardement dépend de l'humidité du sol, sa valeur varie en fonction de la solution.

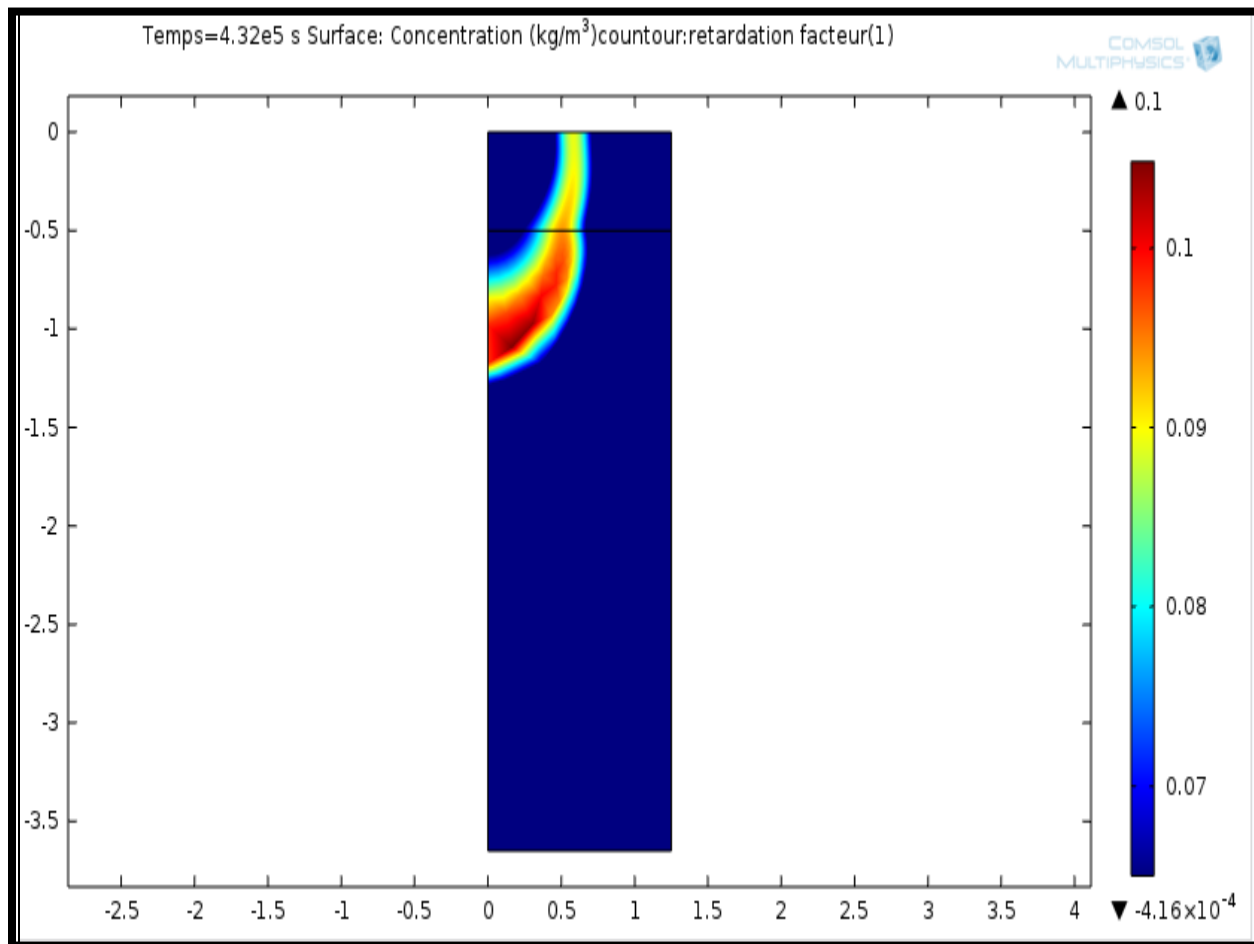


**Fig. III.18 : Diffusion des concentrations dissoutes (tracé de surface) et de facteur de retardement (contours) à 1 jour.**



**Fig. III.19 : Diffusion des concentrations dissoutes (tracé de surface) et de facteur de retardement (contours) à 10 jours**

La figure 20 montre le retard du polluant (nitrates) à la fin de l'intervalle de temps de simulation. Pour le transport de soluté saturé variablement, le facteur de retard se change avec le temps, C'est a dire le processus de sorption a le plus grand potentiel de ralentir le contaminant (nitrates) où les sols sont relativement secs. Le coefficient de retard varie ici de plus ou moins 0,06 à 0,15.



**Fig. III.20 : Analyse sélective du facteur de retardement (de surface et les contours) à 10 jours.**

### **III.6- Conclusion :**

Lors du travail que nous avons effectué dans la première partie, nous avons trouvé beaucoup de difficultés dans l'obtention de données nécessaires et précises concernant la pédologie, la géologie, l'hydrogéologie et les analyses chimiques des eaux souterraines pour déterminer les caractéristiques du sol et sous sol (perméabilité, porosité, essais de pompage ...), ce qui a fortement retardé l'avancée et l'achèvement de notre mémoire. Par la suite, dans la partie modélisation l'export des géométries trouvées afin de les rendre utilisables sous le logiciel Comsol nous a posé également quelques problèmes, ainsi que la limitation en espace disque qui a pris assez de temps possible pour faire les simulations. Cependant, les résultats finaux de notre modèle nous ont permis d'aboutir à des conclusions utiles quant à l'impact environnemental d'une fuite de polluant des nitrates sur les eaux souterraines de la région et leur évolution et diffusion du soluté de nitrates jusqu'à atteindre la profondeur de 73 mètres, En effet, les simulations montrent que le polluant, malgré la diffusion, peut conserver assez de concentrations des nitrates qui dépassent la norme de potabilité (50mg/l). De plus, grâce au modèle simplifié, nous avons pu mettre en évidence l'importance de la géologie locale sur la dispersion du polluant dans les différentes couches de sol lors du transport vertical des polluants.

***CONCLUSION GENERALE***

## **CONCLUSION GENERALE :**

La région de Bir Kasd Ali est caractérisée par un climat continental semi-aride, avec des étés chauds et secs et des hivers froids et pluvieux.

Le bassin versant du Bir Kasd Ali draine une grande surface, de forme allongée, de relief modéré, de pente moyenne, d'une densité de drainage moins dense et de longueur du cours d'eau importante

Dans l'étude hydrogéologique on est intéressé à l'aquifère superficiel, constitué essentiellement par des formations du Quaternaire qui recouvre la majorité de la zone d'étude caractérisé par les formations alluvionnaires, limons, marnes, conglomérats cimentés et croutes calcaire. L'alimentation de cet aquifère se fait principalement par les précipitations sur l'impluvium des plaines en périodes d'averses. Cet aquifère est capté par un nombre élevé de puits et forages. Comme il est en relation avec les aquifères profonds (en certains endroits),

L'analyse de la carte piézométrique de notre zone d'étude montre les zones correspondantes à des horizons à fort écoulement avec les directions de l'écoulement, Ces écoulements sortent vers le Nord-est par l'intermédiaire d'un axe de drainage. Ainsi, se convergent vers une zone de dépression qui représente l'exutoire principal de l'aquifère.

Les essais de pompage, nous a permis d'estimer les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère et d'estimer les potentialités hydriques souterraines :

La transmissivité moyenne de l'ordre de  $T = 3.04 \cdot 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s, la perméabilité moyenne de  $0.38 \cdot 10^{-4}$  m/s et le coefficient d'emmagasinement (porosité efficace).

La modélisation de la pollution des eaux souterraines effectuée par le logiciel Comsol pour connaître la diffusion et la propagation des fuites des nitrates sur une profondeur de l'aquifère de 73 mètres et ainsi pour suivre leur évolutions dans le temps, nous a permis de penchés sur la compréhension du phénomène de transport de pollution à très faible profondeur et son impact sur les nappes alluviales.

*ANNEXE.*

## ANNEXE

### Etapes du **Modèle Chemin: Subsurface\_Flow\_Module / Solute\_Transport / sorbing\_solute**

#### *Instructions de modélisation*

Du **Fichier** menu, choisissez **Nouveau**.

#### NOUVEAU

1- dans le **Nouveau** fenêtre, cliquez sur le **modèle Assistant** bouton.

#### MODEL WIZARD

1-Dans le **modèle Assistant** fenêtre, clique le **2D axisymétrique** bouton.

2-Dans le **Sélectionnez la physique** arborescence, sélectionnez **L'écoulement du fluide> Porous Media et de subsurface flux> Richards équation (dl)**.

3-Clique le **Ajouter** bouton.

4-dans le **Sélectionnez la physique** arborescence, sélectionnez **Espèces chimiques Transport> Transport de solutés (ESST)**.

5-Clique le **Ajouter** bouton.

6-dans le **Les concentrations** table, entrez les paramètres suivants:

           **C**

7- Cliquez le **Étude** bouton.

8-Dans l'arborescence, sélectionnez **Des études prédéfinies pour la physique sélectionné> dépendant du temps**.

9-Clique le **Terminé** bouton.

#### DEFINITIONS GLOBALES

##### Paramètres

1-Sur le **Accueil** barre d'outils, cliquez sur **Paramètres**.

2-dans le **Paramètres** fenêtre des paramètres, recherchez le **Paramètres** section.

3-Dans le tableau, entrez les paramètres suivants:

prénom	Expression	Valeur	La description
rho	$1e^3 \text{ [kg / m}^3\text{]}$	1000 kg / m <sup>3</sup>	densité du fluide
thetas_1	0,339	0,339	La porosité, la
thetas_2	0,399	0,399	La porosité, la
thetar_1	0,001	0,001	saturation résiduelle,
thetar_2	0,001	0,001	saturation résiduelle,

prénom	Expression	Valeur	La description
Ss_1	(Thetas_1-thetar_1)	3.447E-5 1 /	Coefficient de stockage, la couche 1
Ss_2	(Thetas_2-thetar_2)	4.058E-5 1 /sylvanie	Coefficient de stockage, la couche 2
Ks_1	0,454 [m / d]	5.255E-6 m /s	conductivité hydraulique, la couche
Ks_2	0,298 [m / d]	3.449E-6 m /s	conductivité hydraulique, la couche
alpha_1	1,39 [1 / m]	1,390 1 / m	Le paramètre alpha, couche 1
alpha_2	1,74 [1 / m]	1,740 1 / m	Le paramètre alpha, la couche 2
n_1	1.6	1,600	Le paramètre n, la couche 1
n_2	1,38	1,380	Le paramètre n, couche 2
hp0	0,01 [m]	0,01 m	la tête de pression dans l'anneau
N0	0,01 * * rho Ks_1	5.255E-5 kg / (M <sup>2</sup> · s)	Fuite de la base
rhob	1400 [kg / m ^ 3]	1400 kg / m <sup>3</sup>	Masse volumique apparente
kp	1E-4 [m ^ 3 / kg]	1,000E-4 m <sup>3</sup> / kg	Coefficient de partage
Dl	3.74e-3 [ ^ m 2 / j]	4.329E-8 m <sup>2</sup> / s	Coefficient de diffusion
phil	0,05 [1 / d]	5.787E-7 1 / s	Decay taux en liquide
PhIP	0,01 [1 / d]	1.157E-7 1 / s	taux Decay solide
Alphar	0,005 [m]	0.005000 m	dispersivité longitudinale
alphaz	0,001 [m]	0,001 m	dispersivité transverse
c0	1 [kg / m ^ 3]	1 kg / m <sup>3</sup>	la concentration du soluté dans le

## GEOMETRIE 1

Le domaine de la modélisation est constitué de deux couches de sol perméables, dont chacun est représenté par un domaine rectangulaire en 2D axisymétrique.

### Rectangle 1 (r1)

1-dans le **Model Builder** fenêtre, en dessous de **Le composant 1 (COMP1)** clic-droit

## ANNEXE

**géométrie 1** et choisissez **Rectangle**.

2-dans le **Rectangle** fenêtre des paramètres, recherchez le **Taille** section.

3-dans le **Largeur** champ d'édition, le type 1,25.

4-dans le **la taille** champ d'édition, le type 0,9.

5-Localisez le **Position** section. dans lez champ d'édition, le type -1,3.

6-Clique le **construire sélectionné** bouton.

### Rectangle 2 (r2)

1-dans le **Model Builder** fenêtre, clic-droit **géométrie 1** et choisissez **Rectangle**.

2-dans le **Rectangle** fenêtre des paramètres, recherchez le **Taille** section.

3-dans le **Largeur** champ d'édition, le type 1,25.

4-dans le **la taille** champ d'édition, le type 0,4.

5-Localisez le **Position** section. dans lez champ d'édition, le type -0,4.

6-Clique le **construire sélectionné** bouton.

7-Clique le **zoom Etendu** bouton de la barre d'outils graphiques.

À terminer la géométrie du modèle, ajouter un point sur la limite supérieure de marquage bord extérieur de l'étang.

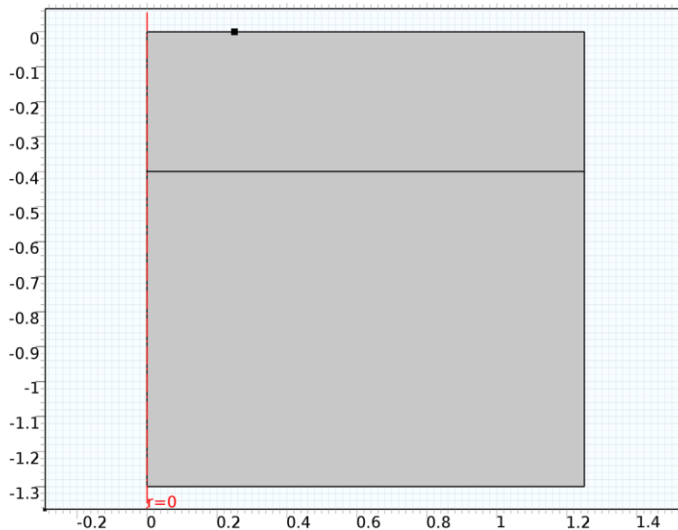
### Le point 1 (PT1)

**1** . Clic-droit **géométrie 1** et choisissez **Point**.

**2** dans le **Point** fenêtre des paramètres, recherchez le **Point** section.

**3** dans le **r** champ d'édition, le type 0,25.

**4** Cliquez le **Construire tous les objets** bouton



## EQUATION DE RICHARDS » (DL)

### Richards équation Modèle 1

- 1 -dans le **Model Builder** fenêtre, élargir la **L'équation (DL) Richards** noeud, puis cliquez sur **Richards équation Modèle 1**.
- 2 -dans le **Richards équation modèle** fenêtre des paramètres, recherchez le **Propriétés des fluides** section.
- 3 -Dans la liste  $\rho$ , choisissez **Défini par l'utilisateur**. Dans le champ édition associé, le typerho.
- 4 -Localisez le **Propriétés de la matrice** section. Dumodèle **Perméabilité** liste, choisissez **Conductivité hydraulique**.
- 5 -Dans le  $K_S$  champ d'édition, le type  $Ks\_1$ .
- 6 -Dans le  $\theta_s$  champ d'édition, le type  $thetas\_1$ .
- 7 -Dans le  $\theta_r$  champ d'édition, le type  $thetar\_1$ .
- 8 -Localisez le **Modèle de stockage** section. Dans la liste S, choisissez **Défini par l'utilisateur**. Dans l'**espace de rangement** champ d'édition, tapez  $Ss\_1$ .
- 9 -Localisez le **Modèle de rétention** section. Dans le champ d'édition  $\alpha$  , le type  $alpha\_1$ .
- 10 -Dans le champ modifier n, le type  $n\_1$ .

### L'équation de Richards Modèle 2

- 1 Clic-droit **Le composant 1 (COMP1) > Richards de l'équation (dl) > Richards' Equation 1 Modèle** et choisissez **Dupliquer**.
- 2 Sélectionnez **Domaine 2** uniquement.
- 3 dans le **Richards équation modèle** fenêtre des paramètres, recherchez le **Propriétés de la matrice** section.
- 4 Dans le  $K_S$  champ d'édition, le type  $Ks\_2$ .
- 5 Dans le  $\theta_s$  champ d'édition, le type  $thetas\_2$ .
- 6 Dans le  $\theta_r$  champ d'édition, le type  $thetar\_2$ .
- 7 Localisez le **Modèle de stockage** section. dans le **Espace de rangement** champ d'édition, le type  $Ss\_2$ .
- 8 Localisez le **Modèle de rétention** section. Dans le champ d'édition  $\alpha$  , le type  $alpha\_2$ .
- 9 Dans le champ modifier n, le type  $n\_2$ .

### Les valeurs initiales 1

- 1 dans le **Model Builder** fenêtre, en dessous de **L'équation (DL) Composant 1 (COMP1)> Richards**
- Cliquez **Les valeurs initiales 1**.
- 2 dans le **Les valeurs initiales** fenêtre des paramètres, recherchez le **Les valeurs initiales** section.
- 3 Cliquez le **Tête de pression** bouton.
- 4 Dans le  $H_p$  champ d'édition, le type  $-(z + 1,2)$ .

### Les valeurs initiales 2

1-Clic-droit **Composant 1 (COMP1)> l'équation (DL) Richards> Valeurs initiales 1** et choisissez **Dupliquer**.

- 2Sélectionnez **Domaine 2** uniquement.
- 3 dans le **Les valeurs initiales** fenêtre des paramètres, recherchez le **Les valeurs initiales** section.
- 4 Dans le  $H_p$  champ d'édition, le type  $-(z + 1,2) -0,2 * (z + 0,4)$ .

### *Pression Head 1*

- 1 Sur le **La physique** barre d'outils, cliquez sur **Limites** et choisissez **Tête de pression**.
- 2 Sélectionnez **Limite 5** uniquement.
- 3 dans le **Tête de pression** fenêtre des paramètres, recherchez le **Tête de pression** section.
- 4 Dans le  $H_{p0}$  champ d'édition, le type  $hp0$ .

### *Mass Flux 1*

- 1 Sur le **La physique** barre d'outils, cliquez sur **Limites** et choisissez **Flux de masse**.
- 2 Sélectionnez **Limite 2** uniquement.
- 3 dans le **Flux de masse** fenêtre des paramètres, recherchez le **Flux de masse** section.
- 4 Puis à  $0$  champ d'édition, le type  $-N0$ .

## TRANSPORT DE SOLUTE (ESST)

### *Liquid Mobile, Immobile solides et du gaz 1*

- 1 Cliquez **Composante 1 (COMP1)> Transport de solutés**.
- 2 Sur le **La physique** barre d'outils, cliquez sur **Domaines** et choisissez **Liquid Mobile, Immobile et solide Gaz**.



### concentration 1

- 1 Sur **La physique** barre d'outils, cliquez sur **Limites** et choisissez **Concentration**.
- 2 Sélectionnez Limite 5 uniquement.
- 3 dans le **Concentration** fenêtre des paramètres, recherchez le **Concentration** section.
- 4 Sélectionnez le **espèces c** case à cocher.
- 5 Dans le c0, c champ d'édition, le type c0.

### MESH 1

#### Triangulaire gratuit 1

dans le **Model Builder** fenêtre, dans le **Le composant 1 (COMP1)** clic-droit **mesh 1** et choisissez **triangulaire gratuit**.

#### taille 1

**1** dans le **Model Builder** fenêtre, en dessous de **Le composant 1 (COMP1)**> **Mesh 1** clic-droit **Triangulaire gratuit 1** et choisissez **Taille**.

**2** dans le **Taille** fenêtre des paramètres, recherchez le **Sélection géométrique Entité** section.

**3** Du **niveau de l'entité géométrique** liste, choisissez **Domaine**.

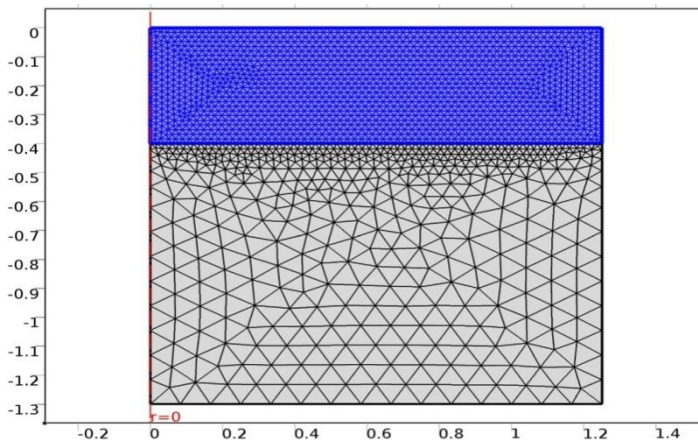
**4** Sélectionnez **Domaine 2** uniquement.

**5** Localisez le **Taille élément** section. Cliquez le **Douane** bouton.

**6** Localisez le **Paramètres des éléments de taille** section. Sélectionnez le **Taille maximale de l'élément** vérifié boîte.

**7** Dans le champ édition associé, le type 0,02.

**8** Cliquez le **construire tous les boutons**.



## ÉTUDE I

### Étape 1: dépendant du temps

- 1 dans le **Model Builder** fenêtre, élargir la **étude 1** noeud, puis cliquez sur **Étape 1: dépendant du temps**.
- 2 dans le **dépendant du temps** fenêtre des paramètres, recherchez le **Paramètres d'étude** section.
- 3 dans le **unité de temps** sélecteur, choisissez **ré**.
- 4 dans le **Fois** champ d'édition, le type Gamme (0,0.1,0.9) Plage (1,1,5).
- 5 Sur le **Accueil** barre d'outils, cliquez sur **Calculer**.

## RÉSULTATS

### *Pression (dl)*

Le premier groupe de tracé par défaut contient un tracé de surface de la distribution de pression. Modifier pour montrer la saturation efficace, la tête de pression et champ de vitesse à des moments différents.

- 1 dans le **Model Builder** fenêtre, Cliquez **Pression (dl)**.
- 2 dans le **Groupe Plot 2D** fenêtre des paramètres, recherchez le **Les données** section.
- 3 Du **Heure (s)** liste, choisissez **0,3**.
- 4 dans le **Model Builder** fenêtre, élargir la **Pression (dl)** noeud, puis cliquez sur **surface 1**.
- 5 dans le **Surface** fenêtre des paramètres, recherchez le **Expression** section.
- 6 Type **dl.Se**.
- 7 dans le **Model Builder** fenêtre, clic-droit **Pression (dl)** et choisissez **Contour**.
- 8 dans le **Contour** fenêtre des paramètres, recherchez le **Expression** section.
- 9 Type **dl.Hp**.
- 10 Localisez le **Les niveaux** section. dans le **total des niveaux** champ d'édition, le type dix.
- 11 Localisez le **Coloration et le style** section. Du **Coloration** liste, choisissez **Uniforme**.
- 12 Du **Couleur** liste, choisissez **Noir**.
- 13 Effacer le **Légende des couleurs** case à cocher.
- 14 Cliquez pour agrandir la **Qualité** section. Du **Résolution** liste, choisissez **Finer**.
- 15 Clic-droit **Pression (dl)** et choisissez **Surface flèche**.
- 16 dans le **Surface flèche** fenêtre des paramètres, recherchez le **Coloration et le style** section.

17 Du **Couleur** liste, choisissez **Noir**.

18 Localisez le **flèche Positionnement** section.

19 dans le **Points** champ d'édition sous **les points de grille de r**, le type 20.

20 dans le **Points** champ d'édition **les points de grille z**, le type 20.

21 Sur le **groupe 2D de l'intrigue** barre d'outils, cliquez sur **Terrain**.

Comparez l'intrigue dans la fenêtre graphique avec celle [Figure 2](#).

22 dans le **Model Builder** fenêtre, Cliquez **Pression (dl)**.

23 dans le **Groupe Plot 2D** fenêtre des paramètres, recherchez le **Les données** section.

24 Du **Heure (s)** liste, choisissez **1**.

25 Sur le **groupe 2D de l'intrigue** barre d'outils, cliquez sur **Terrain**. Comparer avec l'intrigue en [figure 3](#).

26 Clic-droit **Pression (dl)** et choisissez **Rebaptiser**.

27 Allez à la **Renommer 2D Groupe Plot** boîte de dialogue et le type saturation efficace dans le **Nouveau nom** champ d'édition.

28 Cliquez **D'accord**.

Le troisième tracé par défaut montre la concentration de soluté. Suivez les étapes ci-dessous pour reproduire les parcelles [Figure 4](#) et [Figure 5](#).

### **Concentration (ESST)**

1 dans le **Model Builder** fenêtre, en dessous de **Résultats** Cliquez **Concentration (ESST)**.

2 dans le **Groupe Plot 2D** fenêtre des paramètres, recherchez le **Les données** section.

3 Du **Heure (s)** liste, choisissez **0,3**.

4 Clic-droit **Résultats**> **Concentration (ESST)** et choisissez **Contour**.

5 dans le **Contour** fenêtre des paramètres, recherchez le **Expression** section.

6 Cliquez **facteur de retardement (esst.RF\_c)** dans le coin supérieur droit de la section. Localiser la **Les niveaux** section. Dans le **total des niveaux** champ d'édition, le type dix.

7 Localisez le **Coloration et le style** section. Du **Coloration** liste, choisissez **Uniforme**.

8 Du **Couleur** liste, choisissez **blanc**.

9 Effacer le **Légende des couleurs** case à cocher.

10 Localisez le **Qualité** section. Du **Résolution** liste, choisissez **Bien**.

- 11 Sur le **groupe 2D de l'intrigue** barre d'outils, cliquez sur **Terrain**. Comparez le résultat avec celui de [Figure 4](#).
- 12 dans le **Model Builder** fenêtre, Cliquez **Concentration (ESST)**.
- 13 dans le **Groupe Plot 2D** fenêtre des paramètres, recherchez le **Les données** section.
- 14 Du **Heure (s)** liste, choisissez **1**.
- 15 Sur le **groupe 2D de l'intrigue** barre d'outils, cliquez sur **Terrain**. Comparer avec [Figure 5](#). Enfin, tracer le facteur de retard à  $t = 5$  jours ([Figure 6](#)).

### **Concentration (ESST) 1**

- 1 Clic-droit **Concentration (ESST)** et choisissez **Dupliquer**.
- 2 dans le **Groupe Plot 2D** fenêtre des paramètres, recherchez le **Les données** section.
- 3 Du **Heure (s)** liste, choisissez **5**.
- 4- Dans le **Model Builder** fenêtre, élargir la **Concentration (ESST) 1** noeud, puis cliquez sur **surface 1**.
- 5- dans le **Surface** fenêtre des paramètres, recherchez le **Expression** section.
- 6-Type **esst.RF\_c**.
- 7- dans le **Model Builder** fenêtre, en dessous de **Résultats> Concentration (ESST) 1** Cliquez **contour 1**.
- 8- dans le **Contour** fenêtre des paramètres, recherchez le **Coloration et le style** section.
- 9- Du **Couleur** liste, choisissez **Noir**.
- 10-Sur le **groupe 2D de l'intrigue** barre d'outils, cliquez sur **Terrain**.
- 11-dans le **Model Builder** fenêtre, clic-droit **Concentration (ESST) 1** et choisissez **Rebaptiser**.
- 12-Allez à la **Renommer 2D Groupe Plot** boîte de dialogue et le type facteur arriération dans le **Nouveau nom** champ d'édition.  
Cliquez **D'accord**.

*REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES*

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE**

- ATA, Riadh** : développement de méthodes particulières pour la résolution des écoulements à surface libre, Ecole de technologie supérieure université du QUÉBEC, Montréal, le 26 octobre 2007.
- BEN ABDERRAHMANE ADEL**: Simulation numérique de la recharge artificielle d'une nappe souterraine, promotion 2011/2013.
- Ben kadja .A**: Hydraulique souterraine, Cours 1<sup>ère</sup> année Master hydraulique, Université de M'sila, 2013.
- BOUBAKAR HASSANE** : aquifères superficiels et profonds et pollution urbaine en Afrique, 20 septembre 2010.
- Diane Myrand** : guide technique, captage d'eau souterraine pour des résidences isolées, Québec, 2007.
- École Polytechnique de Montréal** : Cours de Modélisation Numérique GCH2535 - Tutoriel COMSOL Multiphysics.
- Eric Goncalvès** -résolution numérique-discrétisation des edp et edo, septembre 2005.
- Eric FERRET Cyril IACONELLI** : Utilisation de COMSOL Multiphysics dans la réalisation de modèles numériques 06/12/2011.
- Fatiha HADJOU** : étude hydrogéologique par modélisation mathématique en vue d'une approche rationnelle et optimale de la gestion des eaux souterraines de la vallée l'oued SEBAOU, 29 / 06 / 2008.
- J.P. LABORDE** : éléments d'hydraulique générale, édition 2007.
- JEAN-FRANÇOIS MERCIER** : simulation des interactions entre les écoulements à surface libre et souterrains.
- [http://www.safewater.org/PDFS/OWF/OWF\\_Science/OWF\\_Science\\_Aquifer.pdf](http://www.safewater.org/PDFS/OWF/OWF_Science/OWF_Science_Aquifer.pdf) : (FEPS) fondation de l'eau potable Sure.
- L.F. KONIKOW US Geological Survey, Reston, Virginia, USA** : utilisation de modèles numériques pour simuler processus d'écoulement et de transport dans les eaux souterrains.
- LES EAUX SOUTERRAINES** : Portrait du bassin versant de la rivière du Diable.
- Maurice CASSAN** : les essais de perméabilité sur site dans la reconnaissance des sols, édition 2005.
- Michel Dysli** : Géologie Appliquée à l'Ingénierie et à l'Environnement, mécanique des sols, 3<sup>ème</sup> édition, mai 1997.
- NADIA KASSOU ET PRILIAS KACIMI** : Cours géodynamique externe: les eaux souterraines. Année universitaire: 2009/2010.
- Ndiaga SOW** : Modélisation des écoulements en milieu poreux non saturé: Application à la recharge naturelle des nappes, 2004/2005.
- Pierre ADAM & Patrice BAPTISTE** : hydrogéologie & forage d'eau.
- V. MERRIEN-SOUKATCHOFF** : Hydrologie et d'hydrogéologie, Année Universitaire 2003/2004.